



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

# FENIKS

- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomaganie fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo-technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

## Pakiet nr 5:

### Zimno, zimniej, najzimniej – od lodów do kriogeniki

**prof. dr hab. Andrzej MAGIERA**  
*Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego*  
*Uniwersytet Jagielloński*

Dostosowanie pakietu do potrzeb zajęć pozalekcyjnych prowadzonych w ramach Projektu FENIKS:

Tematy 1 – 10:

**dr Bogdan BOGACZ**  
*Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego*  
*Uniwersytet Jagielloński*

Temat 11:

**dr Michał RAMS**  
*Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego*  
*Uniwersytet Jagielloński*

Wersja UJ/2.0, maj 2010

[feniks@th.if.uj.edu.pl](mailto:feniks@th.if.uj.edu.pl)  
<http://feniks.ujk.kielce.pl/>



- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomaganie fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

Projekt współfinansowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

**Spis tematów:**

<b>Wstęp .....</b>	<b>1</b>
<b>Temat 1: Temperatura.....</b>	<b>2</b>
<b>Temat 2: Termometr gazowy, temperatura zera bezwzględnego .....</b>	<b>4</b>
<b>Temat 3: Prawa gazu doskonałego .....</b>	<b>7</b>
<b>Temat 4: Związek temperatury z mikroskopową budową materii .....</b>	<b>8</b>
<b>Temat 5: Przekaz ciepła .....</b>	<b>11</b>
<b>Temat 6: Proces adiabatyczny.....</b>	<b>13</b>
<b>Temat 7: Chłodzenie poprzez parowanie.....</b>	<b>16</b>
<b>Temat 8: Temperatura zamarzania roztworu .....</b>	<b>20</b>
<b>Temat 9: Skraplanie gazu .....</b>	<b>22</b>
<b>Temat 10: Efekt magnetokaloryczny – adiabatyczne rozmagnesowanie .....</b>	<b>25</b>
<b>Temat 11: Nowe własności substancji w bardzo niskich temperaturach .....</b>	<b>28</b>

## Wstęp

Celem zajęć pakietu nr 5 „Zimno, zimniej, najzimniej – od lodów do kriogeniki” jest przedstawienie pojęcia temperatury, metod pomiaru temperatury, związku temperatury z mikroskopową budową materii, metod uzyskiwania niskich temperatur, własności materiałów w niskich temperaturach, nowych zjawisk pojawiających się w bardzo niskich temperaturach oraz zastosowania niskich temperatur.

Pakiet został podzielony na tematy, z których każdy wprowadza kolejne metody i urządzenia stosowane do uzyskiwania coraz niższych temperatur. Podstawę każdego tematu stanowią proste eksperymenty. Większość doświadczeń powinna zostać wykonana na zajęciach w szkole. Niektóre eksperymenty wykonywane będą w czasie zajęć na pracowni na uczelni. Część doświadczeń związana z kriogeniką może być przedstawiona w postaci filmów, animacji lub wykonana jako demonstracje na uczelni.

W wersji kolorowej pakiet dostępny jest na stronie internetowej


<http://th-www.if.uj.edu.pl/~feniks/pakiety>

## Temat 1: Temperatura

Celem zajęć jest wprowadzenie pojęcia temperatury i jednocześnie innych wielkości używanych do opisu układów termodynamicznych, które będą przydatne w dalszych częściach pakietu, takich jak pojęcie równowagi termodynamicznej, które pozwala sformułować zerową zasadę termodynamiki wprowadzającą temperaturę. Poprzez cechowanie termoskopu możemy wprowadzić skalę Celsjusza. Wycechowany termoskop można wykorzystać jako termometr do wyznaczenia czasu dochodzenia układu do stanu równowagi.

### Eksperymenty:

- 1) odczuwanie temperatury
- 2) cechowanie termoskopu
- 3) dochodzenie do stanu równowagi– temperatury ciał w stanie równowagi termicznej
- 4) Równowaga termiczna, zerowa zasada termodynamiki
- 5) Dochodzenie do stanu równowagi – pomiar temperatury



Możliwość poparzenia gorącą wodą!

### 1) Odczuwanie temperatury

Przygotuj trzy naczynia ustawiając je w rzędzie. Do jednego np. lewego nalej zimną wodę, do prawego bardzo ciepłą wodę, do środkowego letnią. Lewą rękę włóż do zimnej wody, prawą rękę do ciepłej wody. Ręce należy przez chwilę potrzymać w wodzie, ażeby przyzwyczyli się do panujących temperatur. Następnie obydwie ręce należy zanurzyć w środkowej zlewce (letnia woda).



Spodziewane spostrzeżenia: lewa ręka „informuje” nas, że w środkowej zlewce woda jest ciepła, a prawa przeciwnie, że zimna. Ta sprzeczność podważa zaufanie do możliwości bezpośredniego określania temperatury przez zmysły człowieka i nakłania do szukania obiektywnego sposobu jej określania. Można do tego próbować wykorzystać zależne od temperatury, mierzalne wielkości fizyczne: długość, objętość, ciśnienie, opór elektryczny, napięcie.



### 2) Cechowanie termoskopu

Termoskop można zakupić lub wykonać samodzielnie używając niewielkiej butelki i cienkiej rurki. Termoskop jest urządzeniem wykorzystującym temperaturową zależność objętości cieczy do obserwacji zmian temperatury. Dzięki zastosowaniu cienkiej rurki (lub wręcz kapilary) nawet niewielkie zmiany objętości cieczy mogą być obserwowane i mierzone, jako zmiany poziomu cieczy w rurce. Im mniejsza średnica rurki tym większe zmiany wysokości cieczy w rurce powodowane daną zmianą objętości.

Wykonywane cechowanie termoskopu pozwoli uzyskać termometr mierzący temperaturę w skali Celsjusza. Do zlewki wrzuc pokruszony lód. Poczekaj, aż część lodu się roztopi. Zanurz koniec termoskopu w powstałej mieszaninie wody z lodem. Odczekaj aż poziom cieczy w termoskopie ustabilizuje się i zaznacz go na rurce. Temu poziomowi przyporządkuj wartość temperatury  $0^{\circ}\text{C}$ . Następnie włóż termoskop do wrzącej wody. Poczekaj na ustabilizowanie się poziomu cieczy w termoskopie i zaznacz na rurce poziom cieczy. Temu poziomowi przyporządkuj wartość temperatury  $100^{\circ}\text{C}^*$ . Korzystając z linijki podziel odcinek pomiędzy dwoma zaznaczeniami na równe części przygotowując skalę.

\* $100^{\circ}\text{C}$  to temperatura wrzenia wody pod ciśnieniem normalnym tj. 1013.25 hPa.

### 3) **Dochodzenie do stanu równowagi – temperatury ciał w stanie równowagi termicznej**

Potrzebne są dwa termometry i dwa naczynia, najlepiej metalowe, jedno duże np. garnek dwulitrowy, a drugie małe np. garnuszek półlitrowy. Małe naczynie umieść wewnątrz dużego, a całość obłożoną watą włóż do pudełka. Możesz przygotować przykrywkę styropianową lub kartonową z otworami na dwa termometry. Naczynia należy wypełnić wodą, jedno gorącą, a drugie zimną. Prowadź pomiary temperatur przygotowując wykres ich zależności od czasu.

Możesz zaobserwować, że temperatury wody w obu naczyniach stopniowo zbliżają się do siebie, wyrównują się i stabilizują. Przeprowadzone ćwiczenie pokazuje, że ciała w równowadze termicznej mają taką samą temperaturę.

### 4) **Równowaga termiczna, zerowa zasada termodynamiki**

Dwie zlewki z wodą, jedna z zimną, a druga z gorącą ustaw w pokoju i zmierz co pewien czas temperaturę otoczenia i wody w zlewkach. Jakie będą wskazania, kiedy układ dojdzie do stanu równowagi (wskazania przestaną się zmieniać)?

Wnioskiem z przeprowadzonych obserwacji może być zerowa zasada termodynamiki: *Jeżeli ciało A jest w równowadze termicznej z ciałem B, a ciało B z ciałem C, to ciało A jest w równowadze termicznej z ciałem C* (tutaj ciałami A i C są zlewki z wodą, a ciałem B powietrze).

### 5) **Dochodzenie do stanu równowagi – pomiar temperatury**

Uzyskany po wyskalowaniu termoskopu termometr silnie ochłodzi wkładając go do mieszaniny wody z lodem. Następnie włóż termometr do zlewki z gorącą wodą i co minutę mierz jego wskazania, aż przestaną się zmieniać. Wykonaj wykres temperatury wskazywanej przez termometr w funkcji czasu.

Doświadczenie pokazuje, iż termometr potrzebuje pewnego czasu, aby wskazania ustabilizowały się. W tym czasie termometr i układ mierzony dochodzą do stanu równowagi. Dopiero po tym czasie można dokonać odczytu temperatury.

## Zagadnienia

- 1) Wprowadzenie parametrów używanych do opisu układów termodynamicznych (temperatury, ciśnienia, objętości, energii wewnętrznej) przez jakościowe obserwacje typu:
  - a) szklanka z gorącą wodą ochładza się w pokoju – pojęcie temperatury
  - b) szklanka z gorącą wodą ochładza się w pokoju – kierunek upływu czasu – pojęcie entropii
  - c) pompowanie balonika – można określić ciśnienie i objętość gazu, zwrócić uwagę na zależność pomiędzy ciśnieniem i objętością
  - d) przemiany zgromadzonej energii – energia wewnętrzna. Ogrzewanie domu przez spalanie drewna – łatwy proces (zamiana kilku stopni swobody na wiele stopni swobody). Ruch samochodu dzięki spalaniu benzyny – trudny proces (zamiana kilku stopni swobody na jeden stopień swobody)– konieczny jest silnik.
- 2) Odczucie temperatury – konieczność konstrukcji układu do pomiaru temperatury.

- 3) Równowaga termodynamiczna – układy są w takich stanach, iż po ich połączeniu układ złożony jest w równowadze. Układ jest w stanie równowagi, jeżeli nie obserwujemy zależności jego parametrów od czasu oraz gdy nie ma zależności od historii układu (dwie szklanki z wodą o różnej temperaturze po ostygnięciu w powietrzu, w pokoju zawierają wodę o tej samej temperaturze).
- 4) Zerowa zasada termodynamiki – istnieje pewna wielkość skalarna (temperatura), która jest własnością wszystkich układów, taka że równość temperatur jest warunkiem koniecznym i wystarczającym istnienia równowagi termicznej.
  - a) Jeżeli układ A jest w równowadze termicznej z układem B oraz układ B jest w równowadze termicznej z układem C, to układ A jest w równowadze termicznej z układem C.
  - b) Przykład iż zerowa zasada termodynamiki nie jest trywialna. Jeżeli A ma taki sam kolor jak B oraz B ma taki sam kolor jak C to A ma taki sam kolor jak C. Jeżeli A zna B oraz B zna C, to niekoniecznie A zna C.
- 5) Skala Celsjusza.
- 6) Dochodzenie do stanu równowagi – czas relaksacji

## Temat 2: Termometr gazowy, temperatura zera bezwzględnego

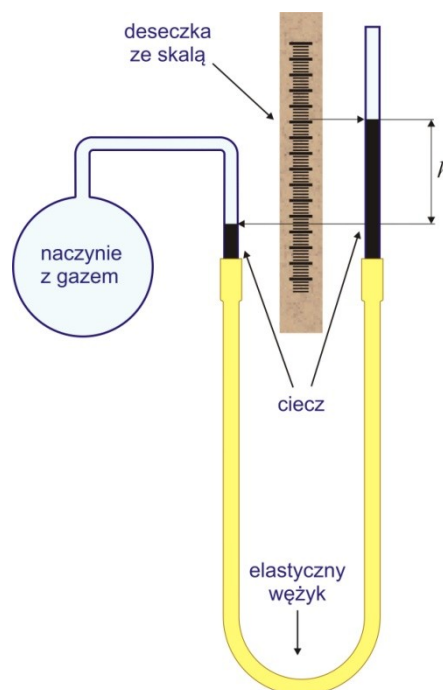
Celem zajęć jest wykonanie termometru gazowego oraz wyznaczenie przy jego pomocy zależności ciśnienia gazu od temperatury. Ekstrapolacja wyników do ciśnienia  $p = 0$  pozwala na wyznaczenie temperatury zera bezwzględnego. Wprowadzona jest temperatura bezwzględna, skala temperatur Kelwina. Dyskutowane są różne cechy fizyczne, które można wykorzystać do pomiaru temperatury. Omawiane są temperatury spotykane we Wszechświecie.

### Eksperymenty:

- 1) termometr gazowy
- 2) wyznaczenie temperatury zera bezwzględnego
- 3) budowa pirometru

#### 1) Budowa termometru gazowego przy stałej objętości

Do aluminiowej puszkii po napoju (najlepiej użyć aluminium, ponieważ ma dobre przewodnictwo ciepłe) włóż szklaną lub metalową rurkę uszczelniając ją gumą do żucia, woskiem lub klejem. Do rurki przymocuj długą, elastyczną, plastikową rurkę. Tą plastikową rurkę przymocuj do pionowej deseczki tak, aby można ją było przesuwac w kierunku pionowym. Najniższy punkt rurki powinien znajdować się 1-1.5 m poniżej pokrywki puszkii. Do plastikowej rurki wlej zabarwioną wodę. Poziom cieczi po obu stronach najniższego punktu rurki powinien być taki sam, a wysokość słupa wody powinna wynosić, co najmniej 1 m. Zaznacz poziom cieczi w części rurki znajdujacej się bliżej pokrywki puszkii. Będzie to poziom ograniczajacy ustaloną objętość gazu (powietrza) w puszcze. We wszystkich pomiarach będziemy tak przesuwali rurkę, aby cieczi w części rurki bliżej puszkii powróciła na zaznaczoną pozycję, czyli objętość powietrza była stała. Zmiana różnicy poziomów cieczi w obu częściach rurki jest miarą zmiany ciśnienia gazu i po wycechowaniu może być miarą temperatury.

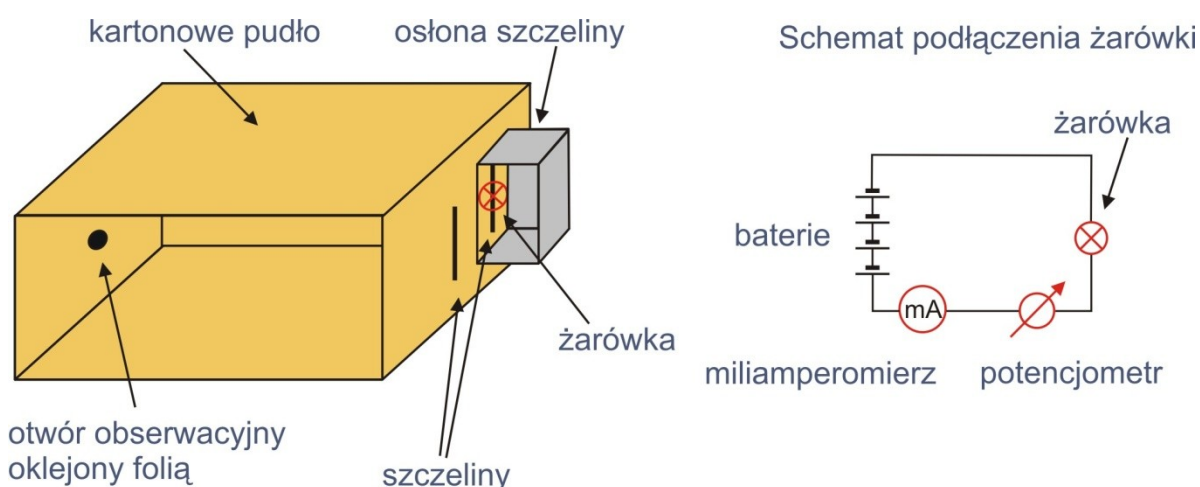


## 2) Temperatura zera bezwzględnego

Puszkę umieść w większym naczyniu wypełnionym wodą. Odczekaj około 2 minut na ustalenie się równowagi (poziom cieczy w rurce nie ulega zmianie). Zmierz temperaturę kąpielii wodnej, w której znajduje się puszką. Ustaw rurkę tak, aby ciecz w części rurki bliżej puszką powróciła na zaznaczoną wcześniej pozycję. W ten sposób zapewniona jest stała objętość gazu używanego do pomiaru. Odczytaj różnicę poziomu cieczy w obu ramionach rurki i oblicz ciśnienie gazu w puszcce. Należy pamiętać o uwzględnieniu ciśnienia atmosferycznego. Powtórz pomiary dla kilku różnych temperatur kąpielii wodnej. Wykonaj wykres zależności ciśnienia gazu w puszcce od temperatury. Dobierz skalę wykresu tak, aby zawierała ciśnienie  $p = 0$  oraz temperaturę  $t = -280^{\circ}\text{C}$ . Przez punkty pomiarowe przeprowadź linię prostą aż do punktu  $p = 0$  i odczytaj z wykresu odpowiadającą temu punktowi temperaturę.

## 3) Budowa pirometru

Do wykonania pirometru konieczne jest kartonowe pudełko po butach, 4 baterie 1.5V, żarówka 6V i 100 mA, liniowy potencjometr  $470 \Omega$ , cienkie kabelki, miliamperomierz. Połącz baterie szeregowo i przy pomocy drucików poprzez miliamperomierz i potencjometr podłącz do nich żarówkę. W boku pudełka wytnij dwie leżące blisko siebie szczeliny, a w przeciwległym boku jeden otwór obserwacyjny. Przymocuj żarówkę do pudełka przy jednej ze szczelin. Osłoń żarówkę tak, aby zewnętrzne światło nie wpadało do szczeliny oraz aby żarówka nie świeciła do drugiej szczeliny.



Otwór obserwacyjny oklej ciemną folią lub ciekłą folią aluminiową. Skieruj wolną szczelinę na ciało, którego temperaturę chcesz mierzyć. Reguluj potencjometrem prąd płynący przez żarówkę tak, aby jasność żarówki była taka sama jak badanego ciała. Odczytaj wskazania miliamperomierza. Można porównać wskazania amperomierza przy obserwacji żarówki, słońca itp. Przy odpowiedniej kalibracji tego pirometru można przy jego pomocy określić temperaturę Słońca.

## Zagadnienia

- 1) Skala Kelwina. Dla rozrzedzonych gazów temperatura jest proporcjonalna do ciśnienia  $T(p) = ap$ . Mamy „naturalne” zero skali, czyli temperaturę, dla której znika ciśnienie  $p = 0$ . Drugi punkt charakterystyczny to punkt potrójny wody (temperatura i ciśnienie 611.73 Pa, odpowiadające temu punktowi zapewniają współistnienie w stanie równowagi wody, lodu i pary wodnej). Zgodnie z normami międzynarodowego układu jednostek SI temu punktowi przyporządkowano temperaturę 273.16 K. Taki wybór zapewnia równość wielkości jednostkowych temperatury w skali bezwzględnej (Kelwina) i w skali Celsjusza. Obie te skale są przesunięte względem siebie o 273.15 K. Ta wartość temperatury (o 0.01 K mniejsza od temperatury punktu potrójnego) jest temperaturą topnienia lodu pod ciśnieniem normalnym (1013.25 hPa), czyli temperaturą,

której zostało przyporządkowane zero w skali Celsjusza. Otrzymana, bezwzględna skala temperatur powiązana jest ze skalą Celsjusza relacją  $T = T_C + 273.15$ .

- 2) Różne cechy fizyczne obiektów można użyć do pomiaru temperatury. Wcześniej (w temacie 1) wykorzystano temperaturową rozszerzalność cieczy, w termometrze gazowym wykorzystano temperaturową zależność ciśnienia stałej porcji gazu w stałej objętości. Tu należy przedstawić zależność napięcia kontaktowego termopary od temperatury, eksperyment cechowania termopary prowadzony będzie na pracowni, na uczelni. Przedyskutować należy także zależność oporu od temperatury, ponieważ eksperyment ten będzie wykonywany na pracowni, na uczelni.

Przykładowe metody pomiaru temperatury zawiera tabela

cecha fizyczna	rodzaj termometru
objętość cieczy	rtęć $-39^{\circ}\text{C} - 356^{\circ}\text{C}$ , spirytus $-85^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$
ciśnienie gazu przy stałej objętości	termometr gazowy
opór elektryczny przewodników	platyna 14 K – 630 K
barwa obiektu	pirometr $> 1000$ K
elektryczne napięcie kontaktowe	termopara $-270^{\circ}\text{C} - +1700^{\circ}\text{C}$

Temperatury we Wszechświecie

$10^{12}$ K	Wszechświat po $10^{-4}$ s po Wielkim Wybuchu, wewnątrz czarnych dziur, zderzenia ciężkich jonów
$10^7$ K	wnętrze Słońca, Tokamak
$10^4$ K	powierzchnia Słońca
$10^3$ K	topnienie miedzi
77 K	wrzenie ciekłego azotu
4 K	skraplanie helu
$10^{-6}$ K	najniższa osiągnięta w laboratorium



### Temat 3: Prawa gazu doskonałego

Celem zajęć jest eksperymentalne sprawdzenie praw przemian gazu doskonałego i wprowadzenie równania stanu gazu doskonałego.

#### Eksperymenty:

- 1) przemiana izotermiczna - prawo Boyle'a – Mariotte'a
- 2) przemiana izobaryczna - prawo Gay – Lussaca
- 3) Przemiana izochoryczna - prawo Charlesa.
- 4) zależność parametrów gazu do ilości gazu

Można kupić prosty zestaw lub można go zbudować samodzielnie. Do wykonania układu pomiarowego konieczne są strzykawki (jedna o pojemności 50 ml, druga o pojemności 100 ml) oraz dwie małe deseczki. Wypustkę w strzykawce do mocowania igły obetnij, a otwór wypełnij kawałkiem plastiku i uszczelnij klejem do plastiku. W jednej z deseczek wytnij otwór tak, aby pasował do niego koniec strzykawki. W otworze tym umocuj strzykawkę tak, aby nie mogła się poruszać. Do końca tłoka umocuj drugą deseczkę. Należy zwrócić uwagę, aby tłok zamocować dość dokładnie na środku deseczki.

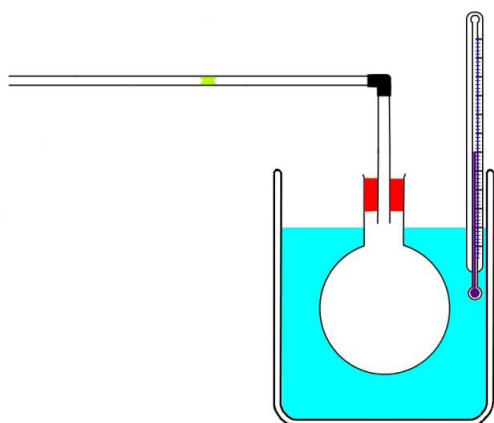


#### 1) Przemiana izotermiczna ( $T=const$ ) - prawo Boyle'a – Mariotte'a

Zmierz średnicę tłoka i oblicz pole powierzchni tłoka. Nasmaruj tłok jakimś smarem, aby łatwiej mógł poruszać się w cylindrze strzykawki. Smar ten służy jednocześnie jako dodatkowe uszczelnienie. Włóż tłok do cylindra strzykawki. Ułóż na deseczce przymocowanej do tłoka przedmioty o znanym ciężarze. Przy każdym obciążeniu zmierz objętość gazu w strzykawce. Znając pole powierzchni tłoka oraz ciężar, którym został obciążony tłok, oblicz ciśnienie wywierane na gaz w strzykawce (należy dodać zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne). Wykonaj wykres zależności objętości od ciśnienia oraz wykres zależności objętości od odwrotności ciśnienia. Dla drugiego wykresu zależność powinna być liniowa, skąd wniosek, że  $V=const./p \Rightarrow Vp=const.$

#### 2) Przemiana izobaryczna ( $p=const$ ) - prawo Gay – Lussaca

- a) Przygotowany do pomiarów (tak jak w poprzednim doświadczeniu) układ włóż do przezroczystego naczynia obciążając dolną deseczkę poprzez położenie na niej jakichś ciężarków. Obciąż tłok znanym ciężarem. Dla temperatury pokojowej odczytaj objętość gazu w strzykawce. Do naczynia nalej wcześniej przygotowaną zimną wodę nie zmieniając obciążenia tłoka. Odczekaj około trzech minut i zmierz objętość gazu w strzykawce oraz temperaturę wody. Wymień wodę w naczyniu kolejno na wodę o temperaturze około 40°C, 60°C oraz 80°C. Dla każdej temperatury zmierz objętość gazu w strzykawce. Wykonaj wykres zależności objętości od temperatury wyrażonej w Kelwinach.



- b) Kolbę o znanej pojemności zamknij korkiem gumowym z rurką szklaną (najlepiej wygiętą jak na rysunku) z kroplą zabarwionej wody wewnątrz. Średnicę wewnętrzną rurki zmierz przy pomocy suwmiarki. Kolbę włóż do naczynia z wodą (powinna być cała zanurzona). Odczekaj chwilę w

celu wyrównania temperatur, zaznacz położenie kropli w rurce i zmierz temperaturę wody. Ogrzewaj powoli wodę dokonując pomiarów zależności położenia kropli w rurce od temperatury [1]. Przygotuj wykresy zależności zmiany objętości powietrza (jeżeli się uda to również całkowitej objętości powietrza) od temperatury wyrażonej w Kelwinach.

W obu przypadkach wynikiem powinna być liniowa zależność objętości od temperatury. Prosta powinna przechodzić przez początek układu współrzędnych, z czego można wyciągnąć wniosek, że  $V = \text{const} \cdot T$ .

### 3) Przemiana izochoryczna ( $V = \text{const}$ ) - prawo Charlesa.

Budując termometr gazowy (temat 2) wykazano, że przy zachowaniu stałej objętości, ciśnienie gazu jest proporcjonalne do temperatury bezwzględnej  $p = \text{const} \cdot T$ .

### 4) Zależność parametrów gazu od ilości gazu

Powtórz pomiary opisane w pierwszym doświadczeniu dla drugiej strzykawki. Można zauważyć, że przy takim samym ciśnieniu, dla większej strzykawki, zawierającej dwukrotnie większą porcję powietrza, otrzymujemy dwukrotnie większą objętość.

### Zagadnienia

- 1) Przemiana izotermiczna ( $T = \text{const}$ ) - prawo Boyle'a–Mariotta,  $pV = \text{const}$ .
- 2) Przemiana izobaryczna ( $p = \text{const}$ ) - prawo Gay–Lussac'a,  $V/T = \text{const}$ .
- 3) Przemiana izochoryczna ( $V = \text{const}$ ) - prawo Charlesa,  $p/T = \text{const}$ .
- 4) Dla stałej temperatury i ciśnienia sprawdzamy zależność objętości od liczby cząstek -  $N$ .
- 5) Otrzymane eksperymentalnie zależności łączymy w równanie Clapeyrona  $pV = NkT$ .

### Literatura:

1. M. Wysocka-Kunisz, Feniks, Pakiet nr 3: Ciepło i silniki.

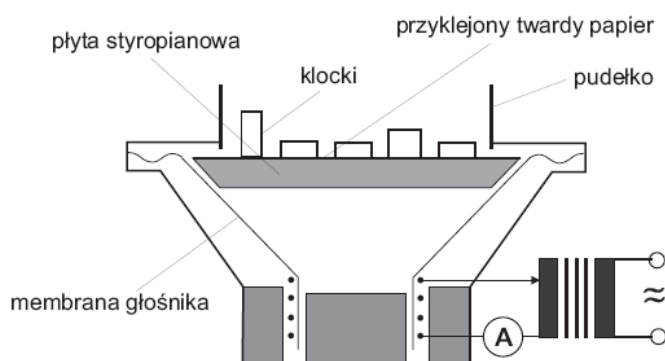
## Temat 4: Związek temperatury z mikroskopową budową materii

Celem zajęć jest demonstracja związku temperatury z energią wewnętrzną układu. Do tego celu służy prosty mechaniczny model gazu – tzw. gaz klockowy.

### Eksperymenty:

- 1) gaz klockowy
- 2) zależność energii wewnętrznej od temperatury
- 3) energia wewnętrzna przy temperaturze zmierzającej do zera

### 1) Model gazu – gaz klockowy



Opisany model gazu bardziej dokładnie omówiony jest w artykule opublikowanym w Postępkach Fizyki [1]. Na rysunku przedstawione jest proste urządzenie do obserwacji mikroskopowego zachowania się obiektów termodynamicznych. Do zbudowania układu doświadczalnego konieczny jest głośnik o mocy przynajmniej kilkunastu watów z dość dużą membraną. Z głośnika należy zdjąć osłonę tak, aby widoczna była membrana głośnika. Do tej membrany dopasować płytę styropianową tak, aby stykała się ona z membraną. Na wierzchnią warstwę styropianu należy nakleić twarde karton. Zamiast płyty styropianowej można wykorzystać odpowiednio grubego karton. Po włożeniu płyty styropianowej brzegi głośnika trzeba okleić twarde kartonem tak, aby tworzyły pudełko. Pobudzanie głośnika do drgań można zrealizować na wiele sposobów. Głośnik może być pobudzany do drgań prądem z transformatora, drgając wtedy z częstotliwością prądu sieci 50 Hz. Jako generatora drgań można także wykorzystać komputer z głośnikiem podłączonym na wyjście audio komputera. Najlepszą metodą pobudzania głośnika jest użycie wzmacniacza, do którego podłączony jest głośnik. W przypadku wykorzystania komputera lub wzmacniacza należy przygotować wcześniej nagranie drgań sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz. Można to wykonać korzystając z darmowych programów komputerowych (np. z programu AUDACITY). Jeżeli używamy wzmacniacza nagranie wykonujemy na płycie CD. Aby uzyskać ilościowe informacje o amplitudzie drgań można pomiędzy urządzenie generujące drgania a głośnik włączyć amperomierz. Na płycie styropianowej należy umieścić kilkadziesiąt klocków. Ilość klocków, które mogą być wprawione w drgania przez głośnik zależy od ich ciężaru i od mocy głośnika. Najlepiej, jeżeli klocki są prostopadłościanami uciętymi z jakiegoś pręta (drewnianego, plastikowego lub metalowego) o przekroju prostokątnym. Ten tzw. gaz klockowy jest modelem materii pozwalającym badać powiązanie mikroskopowych parametrów układu z parametrami makroskopowymi. Model gazu klockowego można wykorzystać także do obserwacji przejść fazowych. Wtedy najlepiej zamiast klocków można użyć plastikowych kuleczek. Można wtedy obserwować parowanie cieczy (kuleczki przy dużej amplitudzie drgań wyskakują z pudełka) i tworzenie ciała stałego (kuleczki przy małej amplitudzie drgań tworzą coś w rodzaju struktury krystalicznej).

## 2) Zależność energii wewnętrznej od temperatury

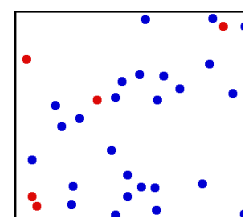
Ustal amplitudę generowanego dźwięku. Na drgający styropian wrzuć klocki. Oczekaj około 2 minut i gwałtownie wyłącz generator dźwięku. Zlicz ilość klocków znajdujących się w dostępnych stanach energetycznych. W przypadku prostopadłościanów są to trzy stany energetyczne rozróżniane przez ścianę, na której stoi prostopadłościan. Pomiar powtórz dla różnej amplitudy generowanego dźwięku.

## 3) Energia wewnętrzna dla zerowej temperatury

Powoli zmniejsz amplitudę drgań w generatorze dźwięku, dochodząc w ten sposób do zerowej amplitudy. Sprawdź ilość klocków w różnych stanach energetycznych.

## Zagadnienia i ćwiczenia

1. Przed wykonaniem doświadczeń warto zapoznać się z mikroskopową budową materii, a w szczególności z mikroskopowym modelem gazu doskonałego [2, 3].
2. Znaleźć zależność energii potencjalnej klocka od położenia jego środka masy.
3. Wykonaj pomiary liczby klocków w odpowiednich stanach energetycznych dla różnej amplitudy drgań i narysuj diagramy. Oblicz całkowitą energię klocków i wykonaj wykres zależności tej energii całkowitej od amplitudy drgań. Otrzymasz jakościową zależność: całkowita energia



klocków (identyfikowana z energią wewnętrzną układu) rośnie ze wzrostem amplitudy drgań głośnika (utożsamianej z temperaturą).

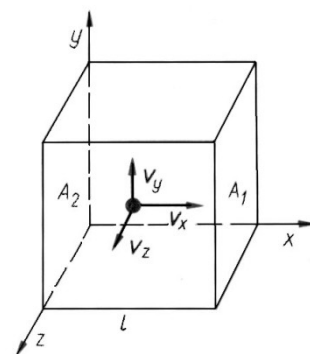
4. Ciśnienie jako zmiana pędu cząsteczki gazu doskonałego uderzającej w ścianę [4, 5].

Rozważmy sześcian o boku  $l$  zawierający  $N$  cząstek gazu. Pęd cząsteczki po sprężystym zderzeniu ze ścianą zmienia się na przeciwny, więc zmiana pędu wynosi  $\Delta p_x = 2mv_x$  (rozpatrujemy na razie tylko składową prędkości i pędu wzdłuż osi x). Jeżeli odległość między ścianami naczynia wynosi  $l$  to czas, w jakim cząstka powróci i ponownie uderzy w ścianę wynosi  $\Delta t = \frac{2l}{v_x}$ . W tym czasie ścianie przekazywany jest pęd  $\Delta p_x$ , więc

siła wywierana na ścianę wynosi  $F_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{mv_x^2}{l}$ . Dla  $N$

cząstek i pola powierzchni ściany  $l^2$  otrzymujemy ciśnienie  
(uwaga: tu  $p$  oznacza ciśnienie)  $p = \frac{F_x}{l^2} = \frac{Nm \langle v_x^2 \rangle}{l^3}$ ,

gdzie  $\langle v_x^2 \rangle$  jest średnią prędkością kwadratową (Sumujemy  $v_x^2$  dla wszystkich cząsteczek i dzielimy przez ich liczbę). Pamiętając, że objętość  $V = l^3$  dostajemy  $pV = Nm \langle v_x^2 \rangle$ .



Do tej pory rozważania były jednowymiarowe. Uwzględniając, że prędkość jest wektorem w 3 wymiarach dostajemy  $\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$ . Zakładając, że żaden kierunek nie jest wyróżniony  $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$  otrzymujemy,  $\langle v^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle$ , a więc  $pV = \frac{1}{3} Nm \langle v^2 \rangle$ . Uwzględniając, że średnia energia kinetyczna cząsteczki  $E_k = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$  otrzymujemy relację

$$pV = \frac{2}{3} NE_k$$

między parametrami makroskopowymi charakteryzującymi gaz; ciśnienie i objętość, a liczbą cząsteczek gazu  $N$  oraz średnią energią kinetyczną ruchu postępowego przypadającą na cząsteczkę.

**Temperaturę można zdefiniować, jako wielkość wprost proporcjonalną do średniej energii kinetycznej  $E_k$  ruchu postępowego przypadającej na jedną cząsteczkę**

$$T \equiv \frac{2}{3k} E_k = \frac{2}{3k} \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}$$

Dobór współczynnika proporcjonalności  $\frac{2}{3k}$ , a więc wielkości „ $k$ ” decyduje o wyborze skali temperatury. Zgodnie z ustaleniami międzynarodowego układu jednostek SI trzeba tak go dobrać, ażeby punktowi potrójnemu wody odpowiadała temperatura 273.16. Tak, więc wartość wielkości „ $k$ ” nazywanej stałą Boltzmanna wynika z właściwości wody i została wyznaczona eksperymentalnie.

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

Jednostką temperatury w tej skali jest Kelwin [K].

Zastępując we wyprowadzonej relacji średnią energię kinetyczną przez temperaturę, otrzymujemy wprowadzone wcześniej, na podstawie obserwacji eksperymentalnych, równanie stanu gazu doskonałego Clapeyrona:

$$pV = NkT$$

5. Osiągnięcie minimum energii wewnętrznej przy temperaturze zmierzającej do zera.

#### Ważne.

Temperatura bezwzględna jest wielkością wprost proporcjonalną do średniej energii kinetycznej ruchu postępowego cząsteczek przypadającej na jedną cząsteczkę.

#### Literatura

1. K. Siegel, K. Sokalski, Postępy Fizyki 36 (1985) 161.
2. <http://pl.wikipedia.org/wiki/Temperatura>.
3. <http://panoramix.ift.uni.wroc.pl/~wgan/stary/gas.htm>.
4. J. Blinowski, W. Zielicz, Fizyka i astronomia, WSiP Warszawa 2002.
5. C. Bobrowski, Fizyka - krótki kurs, WNT Warszawa 1999.

### Temat 5: Przekaz ciepła

Celem zajęć jest omówienie sposobów przekazu ciepła (energii wewnętrznej) czyli przewodnictwa cieplnego, konwekcji (unoszenia) i promieniowania cieplnego. Demonstrowane jest działanie osłon cieplnych w postaci folii aluminiowej. Eksperymenty umożliwiają omówienie budowy i zasady działania kalorymetru, termosu oraz naczynia Dewara używanego do przechowywania skroplonych gazów.

#### Eksperymenty:

- 1) przewodnictwo cieplne
- 2) konwekcja w cieczy
- 3) konwekcja w gazie
- 4) przekaz energii poprzez promieniowanie – radiometr
- 5) szybkość zmian temperatury przy kontakcie z powietrzem
- 6) szybkość zmian temperatury przy zastosowaniu osłony z folii aluminiowej

#### 1) Przewodnictwo cieplne [1]

Przygotuj kilka naczyń podobnej wielkości wykonanych z różnych materiałów np. szklankę, garnuszek porcelanowy, garnuszek metalowy, kubek styropianowy (można szklankę umieścić w styropianowej osłonie). Przygotuj kartoniki do przykrycia naczyń z otworami na termometr.

Będzie potrzebny termometr (lepiej kilka jednakowych termometrów) i gorąca woda.

- a) Nalej gorącej wody do porcelanowego garnuszka, dotknij jego zewnętrznej powierzchni.

Temperatura zewnętrznej powierzchni naczynia stopniowo rośnie. To znaczy, że potrzebny jest czas, żeby ciepło od wewnętrznej strony naczynia przedostało się przez ściankę na zewnątrz. Ten proces przepływu ciepła nazywamy przewodnictwem cieplnym. Cząsteczki materiału, z którego zbudowane jest naczynie, kolejno przekazują swoją energię drgań sąsiednim cząsteczkom.



Możliwość poparzenia gorącą wodą lub przy dotykaniu gorącego naczynia!

- b) Nalej gorącej wody do wszystkich naczyń i dotykając ich zewnętrznych powierzchni postaraj się określić, które grzeją się najszybciej, a które najwolniej.  
Nie wszystkie materiały jednakowo szybko przewodzą ciepło. Te, które bardzo szybko przewodzą ciepło (np. metale) nazywamy przewodnikami cieplnymi, a te, które źle przewodzą ciepło (np. drewno, styropian) izolatorami cieplnymi.
- c) Nalej gorącej wody do wszystkich naczyń, odczekaj kilkanaście sekund i wylej wodę. Jeszcze raz napełnij wszystkie naczynia, tym razem jednakową ilością wrzątku, przykryj kartonikami i rozpocznij pomiary temperatury w funkcji czasu. Przygotuj wykresy zależności temperatury od czasu dla wszystkich naczyń.

## 2) Konwekcja w cieczy

Zlewkę z zimną wodą ustaw na źródle ciepła (palnik gazy, spirytusowy, kuchenka elektryczna). Do wody wrzuć kilka kryształków nadmanganianu potasu. Rozpuszczający się w wodzie nadmanganian potasu barwi ją, stając się znacznikiem pozwalającym obserwować ruch wody.

Obserwowany ruch nagrzanych porcji wody do góry nazywa się konwekcją (unoszeniem). Jest on konsekwencją rozszerzalności termicznej wody\* (zmniejszania się gęstości wody wraz ze wzrostem temperatury) i prawa wypory Archimidesa. Konwekcja jest podstawowym sposobem rozprzestrzeniania się ciepła w większości cieczy i we wszystkich gazach.

\*Prawdziwe dla wody o temperaturze większej od 4 °C, ze względu na anomalną rozszerzalność termiczną wody.

## 3) Konwekcja w gazie

Serwetkę z bibuły rozdziel na pojedyncze warstwy. Zwiń z bibuły dwa ruloniki o średnicy około 4 cm. Papierową taśmą klejącą połącz ze sobą ruloniki tak, aby tworzyły wysoki komin. Postaw komin na szklanej lub metalowej płytce. Podpal górę komina tak, aby równo paliła się cała jego góra.

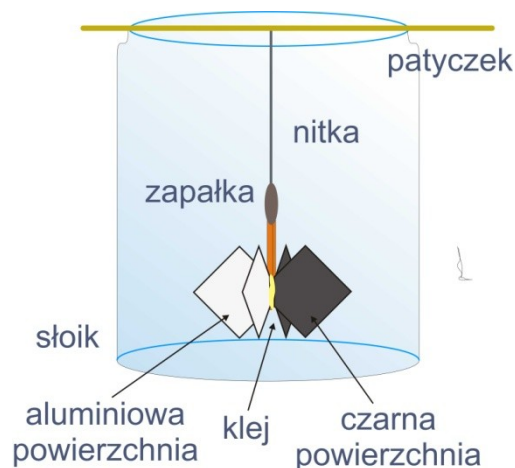
Po spaleniu się całego komina pozostaje duży kawałek popiołu, który dzięki konwekcji ciepłego powietrza unoszony jest wysoko do góry.



W powietrze może się unieść fragment palącej się serwetki. Doświadczenie należy wykonywać z dala od łatwopalnych przedmiotów.

## 4) Przekaz energii poprzez promieniowanie – budowa radiometru

Z białego kartonu wytnij cztery prostokąty o bokach 0.5 i 1 cm. Jedną z powierzchni każdego prostokąta pomaluj czarnym pisakiem. Do drugiej powierzchni każdego prostokąta naklej folię aluminiową. Do jednego z końców zapalki przyklej przygotowane prostokąty tak, aby czarne powierzchnie znajdowały się po tej samej stronie. Przygotowana część powinna tworzyć koło łopatkowe. Do drugiego końca zapalki przyklej kilkucentymetrową nitkę. Drugi koniec nitki przyklej taśmą na środku patyczka. Kładąc patyczek na wierzchu słoika zawieś w nim przygotowane urządzenie. Dobierz wielkość słoika, długość patyczka i nitki tak, aby całe urządzenie (radiometr) swobodnie zwisało w słoiku. Postaw przygotowany radiometr w nasłonecznionym miejscu. Po pewnym czasie powinien zacząć się obracać.



## 5) Szybkość zmian temperatury przy kontakcie z powietrzem

Przygotuj dwa słoiki (dwie zlewki) o zbliżonej średnicy takiej, aby jeden słoik mieścił się w drugim. Na dnie większego słoika połóż drewniany klocek lub kawałek styropianu. Grubość klocka



dobierz tak, aby po włożeniu mniejszego słoika do większego brzegi słoików znalazły się na tym samym poziomie. Uszczelnij szparę pomiędzy brzegami słoika przy pomocy waty. Do małego słoika nalej gorącej wody. Zmierz zmianę temperatury wody w funkcji czasu.

#### 6) *Szybkość zmian temperatury przy zastosowaniu osłony z folii aluminiowej*

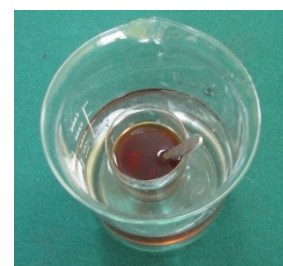
Przygotuj analogiczne urządzenie jak w piątym doświadczeniu. Owiń mały słoik aluminiową folią przed włożeniem go do dużego słoika. Zmierz zmianę temperatury wody w funkcji czasu.

#### Zagadnienia

1. Przekaz ciepła przez przewodnictwo cieplne.
2. Przekaz ciepła w gazach i cieczach poprzez konwekcję. Zwróć uwagę na konieczność istnienia ośrodka, ażeby istniała możliwość przekazu ciepła przez przewodnictwo cieplne lub konwekcję – próżnia ma własności izolacyjne.
3. Przekaz ciepła poprzez promieniowanie. Pochłanianie i odbijanie promieniowania przez różne powierzchnie.
4. Zasada działania kalorymetru, termosu i naczynia Dewara.

#### Osiąganie niskich temperatur.

1. Obniżanie temperatury przez oddawanie ciepła do ośrodka o niższej temperaturze. Gorącą herbatę można ochłodzić wstawiając szklankę do naczynia z zimną wodą. W zjawisku biorą udział omówione procesy przekazywania ciepła.



#### Literatura:

1. M. Wysocka-Kunisz, Feniks, Pakiet nr 3: Ciepło i silniki.

### Temat 6: Proces adiabaticzny

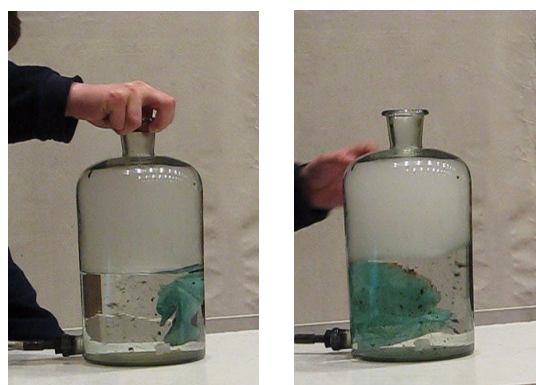
Celem zajęć jest pokazanie, iż w procesie adiabaticznym zachodzi zmiana temperatury układu. W szczególności przy adiabaticznym rozprężaniu gazu następuje spadek temperatury gazu.

#### Eksperymenty:

- 1) powstawanie skroplonej pary wodnej nad otwieraną butelką lub puszką
- 2) skraplanie pary wodnej
- 3) adiabaticzne rozprężanie gazu
- 4) izotermiczne rozprężanie gazu

#### 1) *Otwieranie butelki z gazowanym napojem*

Zastanów się, dlaczego nad otwieraną puszką lub butelką z napojem gazowanym powstaje mgielka skroplonej pary wodnej. Eksperyment ten można także wykonać przy użyciu dymionu na wino. Do dymionu wrzuć dwie zapalone zapałki (lub kawałek zapalonego papieru). Dym posłuży jako ośrodek kondensacji pary wodnej. Dymion zatykamy szczelnie korkiem, w którym zamontowane są dwie rurki. Jedna z rurek jest zgięta, a do drugą rurkę podłącz do kranu i powoli nalej wodę do butli (na zdjęciu woda wlewa się bocznym otworem). W miarę jak w butli przybrywa wody, ciśnienie gazu w butli rośnie. Zanim nadwyżka ciśnienia



spowoduje wypchnięcie korka, puść zgiętą rurkę. Zachodzi bardzo szybkie rozprężenie gazu, tak szybkie, że gaz nie zdąży w tym czasie wymienić ciepła z otoczeniem. Taki proces, w którym nie następuje wymiana ciepła z otoczeniem nazywamy procesem adiabatycznym. Tutaj następuje adiabatyczne rozprężanie.

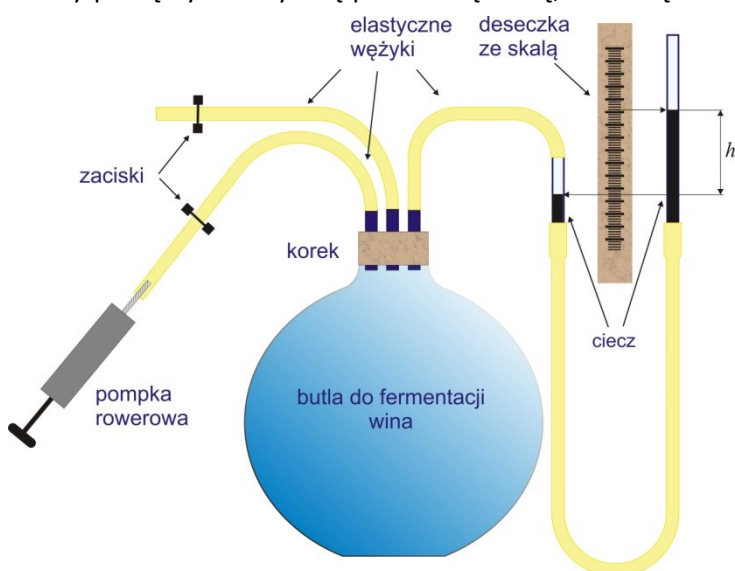
Można zaobserwować pojawienie się w dymionie mgły, czyli zawiesiny kropelek wody powstałej w wyniku skroplenia pary wodnej. Świadczy to o obniżeniu temperatury. Można więc wyciągnąć wniosek, że podczas adiabatycznego rozprężania gaz ochładza się.

## 2) Skraplanie pary wodnej

Do doświadczenia potrzebny jest słoik, gumowa rękawiczka i zapałki. Słoik powinien być tej wielkości, aby można było do niego swobodnie włożyć dłoń. Do słoika nalej niewielką ilość wody. Włóż gumową rękawiczkę palcami w dół. Koniec rękawiczki zamocuj szczelnie wokół brzegu słoika. Włóż rękę do rękawiczki i gwałtownie ją zaciśnij. W tej sytuacji nie zaobserwujesz żadnego efektu. Następnie przed przymocowaniem rękawiczki wrzuć do słoika dwie palące się zapałki. Dym z płonących zapałek, który znajdzie się w słoiku będzie stanowił centra kondensacji pary wodnej. Ponownie zamontuj rękawiczkę na słoiku i powtórz doświadczenie. Teraz obserwujesz powstawanie mgiełki w słoiku spowodowane skraplaniem się pary wodnej. Możesz zaciskanie ręki powtarzać wielokrotnie i przez kilka minut obserwować skraplanie się pary wodnej.

## 3) Adiabatyczne rozprężanie gazu

Dymion na wino (o pojemności przynajmniej 10 litrów) owiń aluminiową folią spożywczą. Do butli dopasuj gumowy korek, w którym należy wykonać trzy otwory. Do otworów włóż szklane lub metalowe rurki, które po włożeniu należy uszczelnić woskiem ze świecy. Do pierwszej rurki należy podłączyć pompkę rowerową poprzez elastyczną, gumową lub plastikową rurkę. Do drugiej rurki należy podłączyć elastyczną plastikową rurkę, która będzie wykorzystywana do pomiaru ciśnienia.



Swobodny koniec plastikowej rurki przymocuj do pionowej deseczki tak, aby najniższy punkt rurki znajdował się około 1 m poniżej korka butli do wina. Do tak przygotowanej rurki nalej ciecz (zabarwioną wodę). Do trzeciej rurki w korku podłącz krótki, elastyczny wężyk gumowy lub plastikowy. Zaciśnij wężyk i napompuj powietrza do butli. Uważaj, aby nie wytworzyć zbyt dużej różnicy ciśnień, ponieważ może doprowadzić to do wylania cieczy znajdującej się w rurce. Zegnij lub zaciśnij rurkę połączoną do pompki. W czasie sprężania gaz w butli uległ ogrzaniu.

Należy więc teraz poczekać aż gaz w butli osiągnie temperaturę otoczenia (poczekaj aż przestanie zmieniać się poziom cieczy w rurkach). Szybko otwórz i zamknij wężyk powodując rozprężenie gazu w butli. Należy otworzyć rurkę odpowiednio szybko, aby proces był adiabatyczny i przytrzymać otwartą dostatecznie długo, aby gaz w butli osiągnął ciśnienie atmosferyczne, a następnie zamknąć rurkę.

Gaz w butli w wyniku procesu adiabatycznego rozprężania ulega ochłodzeniu i ma ciśnienie atmosferyczne (poziom cieczy w obu ramionach rurki jest taki sam). Stopniowo gaz w butli ogrzewa się i poziom cieczy w rurkach zmienia się. Gdy osiągnie temperaturę otoczenia poziom cieczy w rurkach przestaje się zmieniać. Odczytaj wtedy różnicę poziomu cieczy w rurkach i oblicz ciśnienie gazu w butli. Korzystając z równania gazu doskonałego możesz obliczyć temperaturę gazu w butli zaraz po adiabatycznym rozprężeniu.

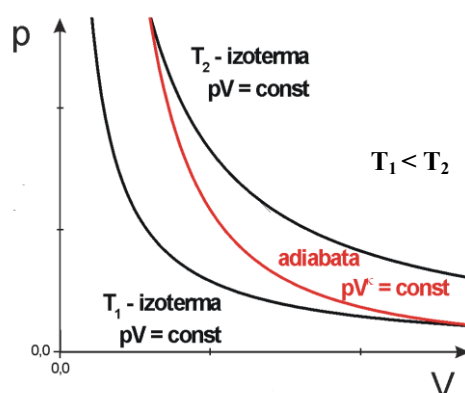


#### 4) Izotermiczne rozprężanie gazu

Doświadczenie wykonaj analogicznie jak opisane w poprzednim punkcie. W przypadku rozprężania izotermicznego wężyk do rozprężania gazu otwórz bardzo powoli. Po wyrównaniu ciśnienia w butli z ciśnieniem atmosferycznym zaciśnij wężyk. Zaobserwuj, iż w tym przypadku ciśnienie gazu w butli nie wzrasta. Oznacza to, że gaz w butli ma przez cały czas temperaturę równą temperaturze otoczenia, czyli przy powolnym rozprężaniu zachodzi proces izotermiczny.

#### Zagadnienia

- 1) Proces jest adiabatyczny, jeżeli nie ma wymiany ciepła z otoczeniem. Można to osiągnąć, jeżeli jest izolacja cieplna lub proces jest przeprowadzony szybko (czas przebiegu procesu jest dużo mniejszy od czasu potrzebnego do przekazania ciepła).
- 2) Kinetyczno-molekularna interpretacja adiabatycznego rozprężania – gaz rozszerzając się wykonuje pracę kosztem własnej energii wewnętrznej. Energia kinetyczna cząsteczek maleje, a więc maleje temperatura.
- 3) Różnica pomiędzy adiabatą i izotermą. Przy adiabatycznym rozprężaniu gazu następuje jego ochłodzenie.



#### Osiąganie niskich temperatur.

- II. Obniżanie temperatury poprzez adiabatyczne rozprężanie (eksperymenty 1-3). Jeżeli rozprężający się gaz wykonuje pracę przeciwko siłom zewnętrznym, a jest pozbawiony możliwości wymiany ciepła z otoczeniem (proces jest adiabatyczny) to wykonuje ją kosztem energii wewnętrznej. Zmniejszenie energii kinetycznej cząsteczek gazu jest równoznaczne z obniżeniem jego temperatury.

## Temat 7: Chłodzenie poprzez parowanie

Celem zajęć jest pokazanie, iż w przejściach fazowych wydzielane lub pobierane jest ciepło. W szczególności w procesie topnienia lodu temperatura mieszaniny wody z lodem nie ulega zmianie, a dostarczane ciepło jest zużywane do zamiany lodu w wodę. Podobnie w procesie wrzenia temperatura mieszaniny pary i cieczy nie ulega zmianie. Ponieważ parująca ciecz pobiera ciepło z otoczenia, efekt ten może być wykorzystany do osiągania niskich temperatur. Chłodzenie przez parowanie wykorzystywane jest w chłodziarkach kompresorowych. Wyjaśniona jest zasada działania lodówki.

### **Eksperymenty:**

- 1) **zmiana temperatury mieszaniny wody i lodu przy dostarczaniu ciepła**
- 2) **chłodzenie ręki wilgotnym materiałem**
- 3) **chłodzenie poprzez odparowanie cieczy z namoczonego materiału**
- 4) **demonstracja zabawki „pijący ptak”**
- 5) **zamrażanie wody pod kloszem pompy próżniowej – demonstracja wykonywana na uczelni**
- 6) **pomiar ciepła topnienia lodu – eksperyment wykonywany na uczelni**

#### **1) Zmiana temperatury mieszaniny wody i lodu w czasie podgrzewania**

Mieszaninę wody z lodem umieść w naczyniu wraz z zamocowanym termometrem. Naczynie ogrzewaj i odczytuj temperaturę co jedną minutę. Podgrzewanie powinno być bardzo wolne, wodę należy przez cały czas mieszać, aby osiągnąć równomierny rozkład temperatury. Wykonaj wykres zależności temperatury wody od czasu.

Można zaobserwować, że temperatura mieszaniny wody z lodem nie ulega zmianie, aż do całkowitego stopienia lodu. Dopiero wtedy temperatura wody zaczyna rosnąć.

#### **2) Chłodzenie ręki wilgotnym materiałem**

Zmocz materiał alkoholem (lepiej eterem) i owiń nim rękę.

#### **3) Chłodzenie poprzez odparowanie cieczy z namoczonego materiału**

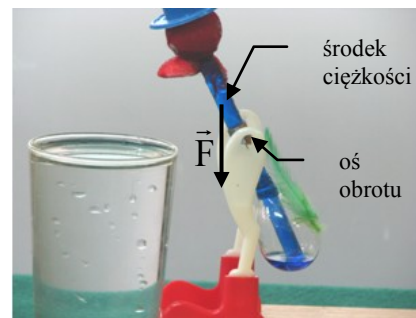
Dwie jednakowe, niewielkie butelki zatkać szczelnie korkami, z zamocowanymi termometrami. Jedną z butelek owiń mokrym materiałem. Można go nasączyć wodą, denaturatem, eterem itp. Co dwie minuty mierz temperaturę w obydwóch butelkach. Doświadczenie możesz powtarzać używając do nasączenia materiału różnych cieczy.

Możesz watą nasączoną wodą owinąć bezpośrednio jeden z dwóch jednakowych termometrów (zdjęcie obok). Obserwowana różnica temperatur zależy od wilgotności względnej powietrza. Prezentowany na zdjęciu zestaw, pozwalający określić tą wilgotność, nazywa się psychrometrem.



#### 4) Zabawka „pijący ptak”

Kup zabawkę „pijący ptak”. Porównaj zachowanie ptaka „pijącego” wodę, denaturat oraz ptaka „pijącego” wodę nakrytego szklanym kloszem (umieszczonego w odwróconym akwarium).



#### 5) Zamarzanie wody pod kloszem pompy próżniowej



Na szkiełko zegarowe nalej kilka kropli wody. Szkiełko umieść pod kloszem pompy próżniowej na podstawce z izolatora termicznego (styropian, korek,...). Szczelnie nakryj kloszem i odpompuj powietrze.

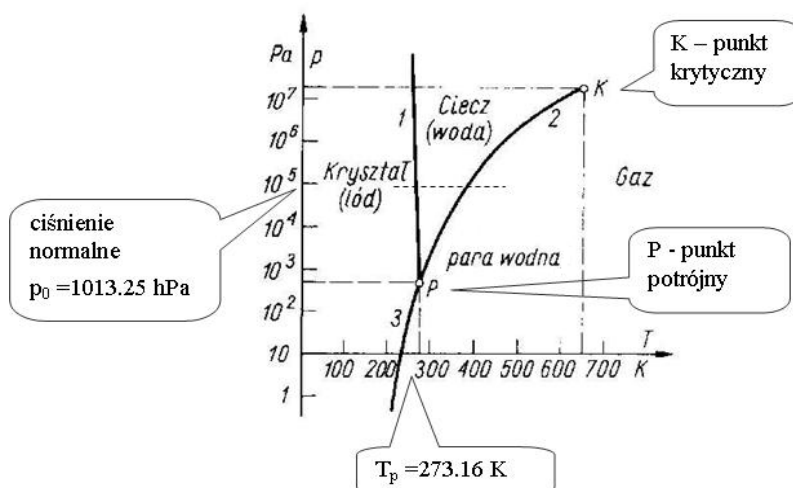
Po odpowiednim obniżeniu ciśnienia powietrza pod kloszem można zaobserwować wrzenie wody. Przy dobrze działającej pompie, po pewnym czasie woda zamienia się w plasterki lodu.

### Zagadnienia

- 1) Równowaga faz i przemiany fazowe. Utajone ciepło przemiany. Zastanów się, dlaczego w czasie podgrzewania mieszaniny wody i lodu temperatura wody nie ulega zmianie. Wyznaczanie ciepła topnienia lodu przy użyciu kalorymetru. Eksperyment ten będzie przeprowadzony na pracowni na uczelni.

Stany skupienia nazywamy inaczej fazami ciała. To, w jakiej fazie dane ciało się znajduje zależy od ciśnienia i temperatury.

Wykres równowagi fazowej dla wody [1].



W punktach leżących na krzywych istnieje równowaga pomiędzy fazami. Krzywe te prezentują zależności:  
 1 – temperatury topnienia lodu od ciśnienia,  
 2 – ciśnienia pary nasyconej nad powierzchnią cieczy od temperatury,  
 3 – ciśnienia pary nasyconej nad powierzchnią lodu od temperatury.

Zmiany stanu skupienia wody wiążą się z koniecznością dostarczenia (odprowadzenia) dużych ilości ciepła. Ciepło topnienia lodu  $334\,000 \frac{J}{kg}$  to taka ilość ciepła, która pozwoliłaby ogrzać tą samą

masę wody o około 80 K (ciepło właściwe wody  $4200 \frac{J}{kg \cdot K}$ ). Ciepło parowania wody około

$2\,400\,000 \frac{J}{kg}$  to taka ilość ciepła, która pozwoliłaby ogrzać tą samą masę wody o około 570 K.

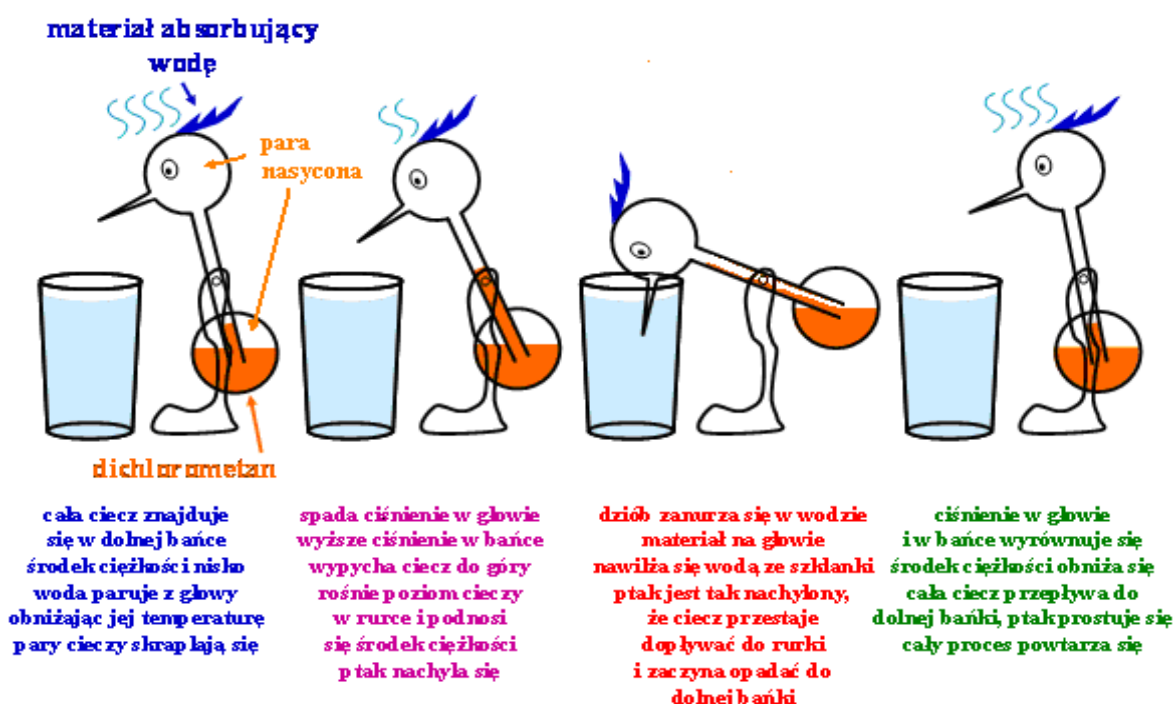
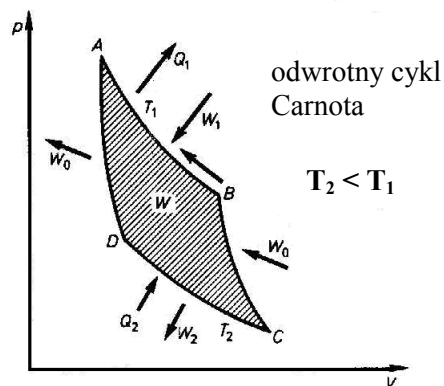
Podane liczby tłumaczą dlaczego woda ma tak ogromne znaczenie w stabilizacji klimatu na ziemi.

2) Układ, w którym następuje odparowanie cieczy ochładza się. W czasie parowania z układu pobierane jest ciepło, które wykorzystywane jest na zmianę stanu skupienia cieczy (ciepło parowania). Omów wyniki wykonanych eksperymentów z chłodzeniem przez parowanie.

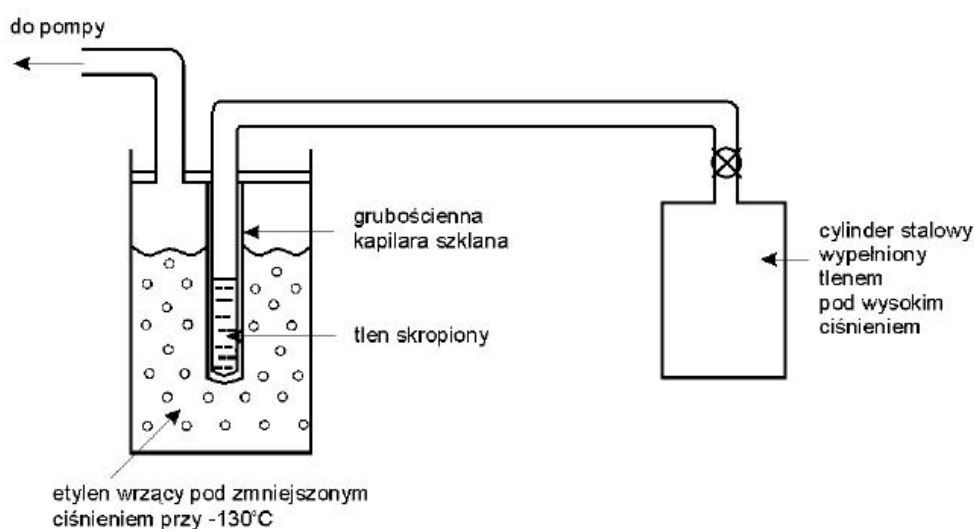
3) Opis zjawiska wrzenia, właściwości pary nasyconej, warunki wrzenia. Wrzenie to proces tworzenia pęcherzyków pary nasyconej wewnątrz cieczy – mówimy o parowaniu w całej objętości. Zależność temperatury wrzenia od ciśnienia jest konsekwencją zależności ciśnienia pary nasyconej od temperatury. Obniżając ciśnienie można doprowadzić ciecz do wrzenia, nawet kosztem energii wewnętrznej, obniżając w ten sposób jej temperaturę (eksperyment 5).

4) Zastanów się, jak działa „pijący ptak” [2].

Ptak jest silnikiem cieplnym [3] działającym dzięki różnicy temperatur dolnej części i głowy (chłodzonej dzięki zjawisku parowania). Różnica tych temperatur jest niewielka, niewielka jest więc sprawność tego silnika, co znaczy, że niewielka część pobieranego przez kuper ptaka z otoczenia ciepła jest zamieniana na pracę. Zdecydowana większość jest oddawana z powrotem do otoczenia przez głowę ptaka.



- 5) Praktyczne urządzenia chłodzące muszą działać cyklicznie. Najprostszy cykl opisujący takie działanie to **odwrotny cykl Carnota** (wszystkie procesy w cyklu Carnota są odwracalne). Takie urządzenie pobiera ciepło ze zbiornika o niższej temperaturze  $T_2$  i oddaje go do zbiornika o temperaturze wyższej  $T_1$ . Działanie to następuje kosztem dostarczonej energii. Można przyrzeć się budowie i działaniu lodówki.
- 6) Pomiar ciepła topnienia lodu – eksperyment wykonywany na uczelni.
- 7) Skroplenie gazów przez Wróblewskiego i Olszewskiego. W 1882 roku francuski fizyk L. P. Cailletet osiągnął temperaturę  $-105^{\circ}\text{C}$  w kapilarze otoczonej wrzącym etylenem. Wróblewski i Olszewski przebudowali aparaturę Cailleteta. Znacznie obniżyli ciśnienie nad parującym etylenem (do  $1/30$  atm), co pozwoliło na uzyskanie temperatury  $-160^{\circ}\text{C}$ , a więc niższej od temperatury krytycznej tlenu (ok.  $-119^{\circ}\text{C}$ ). Więcej prostych informacji znajdziesz na stronie internetowej <http://www.if.uj.edu.pl/Foton/83/pdf/anegdoty.pdf>



### Osiąganie niskich temperatur.

III. Obniżanie temperatury przez parowanie (eksperyment 2-4) i wrzenie pod obniżonym ciśnieniem (eksperyment 5).

IV. Odwrotny proces Carnota.



### Literatura

1. C. Bobrowski, Fizyka - krótki kurs, WNT Warszawa (1999) 196.
2. K. Ernst „Wiecznie spragniony ptak” Wiedza i Życie, Wrzesień (1998) 52.
3. A. Czerwińska, B. Sagnowska, Fizyka dla szkół średnich, ZamKor Kraków 1999.

## Temat 8: Temperatura zamarzania roztworu

Celem zajęć jest pokazanie, iż temperatura zamarzania roztworu jest niższa niż temperatura zamarzania czystego rozpuszczalnika. Efekt ten wykorzystywany jest do rozpuszczania lodu na drogach, a dawniej był wykorzystywany np. do robienia lodów.

### Eksperymenty:

- 1) zmiana temperatury roztworu soli w wodzie w zależności od stężenia roztworu
- 2) zmiana temperatury wrzenia roztworu w zależności od stężenia roztworu
- 3) robienie lodów bez lodówki

#### 1) Zmiana temperatury roztworu soli w wodzie w zależności od stężenia roztworu

Do zapinanej torebki plastikowej włóż odważony wcześniej lód i termometr. Wstrząśnij około 5 minut i odczytaj temperaturę. Do torebki dosyp odważoną ilość soli. Znowu wstrząśnij 5 minut i odczytaj temperaturę. Doświadczenie powtórz dosypując coraz więcej soli. Otrzymasz ostatecznie zależność temperatury roztworu od stężenia soli.

#### 2) Zmiana temperatury wrzenia roztworu w zależności od stężenia roztworu

Do wykonania doświadczenia potrzebne są dwie identyczne zlewki lub niewielkie garnuszki. Do jednej zlewki wlej wodę, do drugiej zlewki wlej taką samą ilość stężonego roztworu soli. Przykryte zlewki postaw na maszynie do gotowania i podgrzej aż do wrzenia.

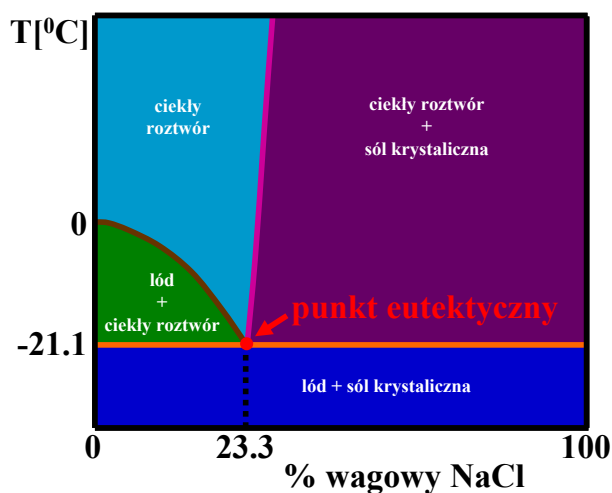
Zaobserwuj, iż najpierw zaczyna wrzeć czysta woda, a dopiero później zaczyna wrzeć roztwór. W momencie, kiedy ciecze zaczną wrzeć zmierz ich temperaturę.

#### 3) Robienie lodów bez lodówki

Do wykonania doświadczenia potrzebne są duże i małe zapinane torebki plastikowe. Do dużej torebki włóż lód, do małej wlej mleko, dodaj cukier i cukier waniliowy. Z małej torebki wyciśnij przed zamknięciem powietrze. Włóż małą torebkę do dużej i wstrząśnij. Wyjmij małą torebkę – i nie masz lodów. Teraz dodatkowo do dużej torebki wsyp sól. Włóż do niej małą torebkę i po usunięciu powietrza zamknij i wstrząśnij przez 5 minut. Wyjmij małą torebkę z lodami waniliowymi.

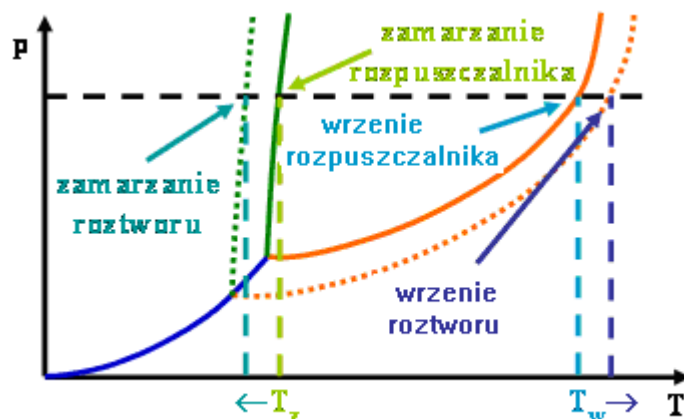
### Zagadnienia

- 1) Zależność temperatury zamarzania roztworu od jego stężenia. Spójrz na przedstawiony obok wykres (musisz mieć przed oczami jego wersję barwną, dostępną na stronie o adresie podanym we wstępie). W pierwszym doświadczeniu wyznaczona jest jakościowo krzywa brązowa. Jest to krzywa równowagi ciekłego roztworu oraz mieszaniny lodu i ciekłego roztworu. Zwrócić uwagę, iż przy obniżaniu temperatury najpierw zamarza woda, a potem roztwór. Pokazana metoda pozwala uzyskiwać niskie temperatury tylko w ograniczonym zakresie. W przypadku roztworu soli w wodzie jest to  $-21.1^{\circ}\text{C}$ , którą to temperaturę uzyskuje się dla stężenia wagowego 23.3% soli (jest to tzw. punkt eutektyczny).



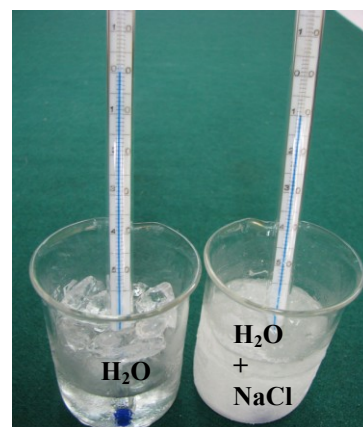


- 2) Przesunięcie krzywych równowagi dla roztworów. Dwa pierwsze doświadczenia pozwalają na stwierdzenie, iż temperatura zamrażania roztworu maleje, a temperatura wrzenia rośnie. Porównaj wykres fazowy czystego rozpuszczalnika z jego postacią dla roztworów.



#### Osiąganie niskich temperatur.

- V. Obniżanie temperatury przez wykorzystanie mieszanin oziębiających [1]. Mieszanina lodu z chlorkiem sodu (solą) pozwala osiągnąć temperaturę 252 K (eksperyment 3), a z chlorkiem wapnia 223 K. Podczas tworzenia mieszaniny oziębiającej część energii kinetycznej cząsteczek zostaje wykorzystana do zmiany stanu skupienia (ciepło topnienia, lód zamienia się w wodę), temperatura się obniża.



#### Literatura:

1. C. Bobrowski, Fizyka - krótki kurs, WNT Warszawa 1999, str. 197.

## Temat 9: Skraplanie gazu

Celem zajęć jest demonstracja zachowania się układu złożonego z oddziałujących składników. Badana jest także ściśliwość gazów i cieczy. Na tej podstawie przedstawione jest zachowanie gazu rzeczywistego (gaz van der Waalsa) i omówione jest jego zachowanie się w różnych warunkach. Wiadomości te wykorzystane są do omówienia skraplania gazu w procesie Joule'a-Thomsona, oraz proces Lindego stosowany na skalę przemysłową do skraplania gazu.

### Eksperymenty:

- 1) **pływające plasterki parówek**
- 2) **ściśliwość gazu i cieczy**

#### 1) *Plasterki parówek jako model gazu van der Waalsa*

Kilka parówek o małej średnicy pokrój w plasterki o grubości około 0.5 cm. W garnku o dużej średnicy zagotuj wodę. Niewielką ilość plasterków wrzuć do garnka. Po ogrzaniu plasterki parówek będą pływały na powierzchni. Wzburz wodę (nie poprzez proste zamieszanie!) tak, aby plasterki wykonywały ruchy losowe. Obserwujemy, że plasterki poruszają się niezależnie, ewentualnie rzadko zderzając się ze sobą. Nawet, gdy woda nie jest silnie wzburzona plasterki poruszają się prawie niezależnie od siebie. Otrzymałeś symulację gazu doskonałego, ponieważ plasterki przy



ich niewielkiej ilości są zdecydowanie mniejsze od średniej odległości między nimi.

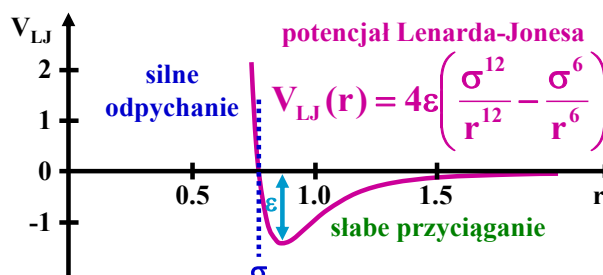
Dodaj większą ilość plasterków i powtórz obserwację. W przypadku wzburzonej wody widzisz, że plasterki poruszają się jak w poprzednim przypadku. Jeżeli woda nie jest wzburzona plasterki zaczynają się samorzutnie łączyć ze sobą. Otrzymałeś model gazu van der Waalsa i jednocześnie model skraplania takiego gazu.

#### 2) *Ściśliwość gazu i cieczy*

Tłok strzykawki przyklej na środku drewnianej lub plastikowej płytce. Do strzykawki wciągnij powietrze. Zatkaj wylot strzykawki i zamocuj ją tak, aby płytka dołączona do tłoka znajdowała się na górze. Na płytkę połóż obciążenie i zademonstruj, że przy pomocy niewielkiej siły (małego ciśnienia) potrafisz sprężyć gaz (czyli zmniejszyć jego objętość). Następnie do strzykawki wciągnij wodę, naciskając tłok wypompuj ze strzykawki powietrze. Zatkaj wylot strzykawki i zademonstruj, że przy zastosowaniu takiej samej siły jak poprzednio nie można spowodować zauważalnej zmiany objętości cieczy. Możesz zwiększać obciążenie płytki (powiększać ciśnienie) ciągle nie obserwując mierzalnych zmian objętości cieczy.

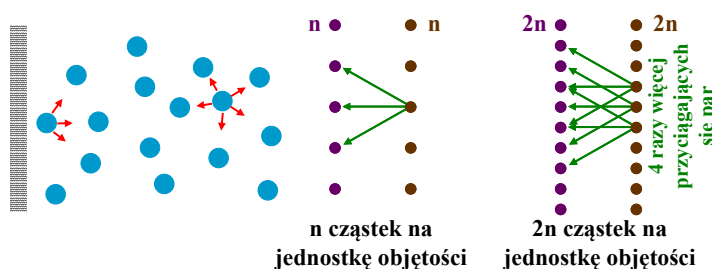
### Zagadnienia

- 1) Oddziaływanie cząstek gazu rzeczywistego – potencjał Lenarda-Jonesa. Oddziaływanie można prześledzić na przykładzie plasterków parówek. W przypadku parówek odpychanie związane jest ze skończonym rozmiarem plasterków i niemożnością przenikania się. Przyciąganie w przypadku plasterków związane jest z siłami przylegania.





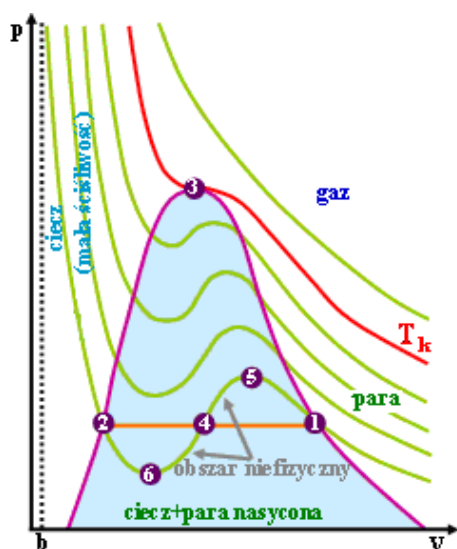
- 2) Dzięki części długozasięgowej oddziaływania (przyciąganie na dużych odległościach) w gazie rzeczywistym istnieje dodatkowe ciśnienie proporcjonalne do kwadratu liczby cząsteczek w jednostce objętości. Liczba par przyciągających się cząstek rośnie jak kwadrat liczby cząstek na jednostkę objętości, czyli jak  $N^2/V^2$ , więc działa dodatkowe ciśnienie  $aN^2/V^2$  [1].



- 3) Dzięki krótkozasięgowej części oddziaływania (silnie rosnące odpychanie na małych odległościach) objętość dostępna dla cząstek jest mniejsza. Cząsteczki praktycznie nie mogą zbliżyć się na odległości mniejsze od  $\sigma$ . Objętość swobodna dostępna dla ruchu cząstek jest więc pomniejszona o objętość zajmowaną przez cząsteczki i wynosi  $V - Nb$  (gdzie  $N$  – liczba cząstek,  $b$  – parametr zależny od  $\sigma$ ) [1].

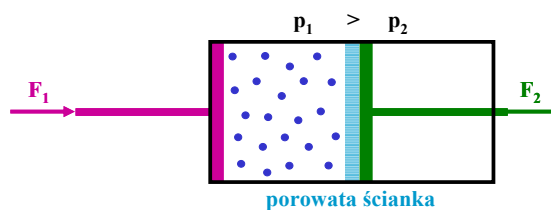
- 4) Ostatecznie otrzymujemy równanie stanu van der Waalsa  $\left(p + \frac{N^2}{V^2} a\right)(V - Nb) = NkT$  które zastępuje równanie stanu gazu doskonałego Clapeyrona.

- 5) Równanie van der Waalsa zaskakująco dobrze opisuje właściwości stanu gazowego, a nawet cieczy. Wyliczone na podstawie tego równania izotermy zostały na rysunku zaznaczone kolorem jasnozielonym, izoterma krytyczna kolorem czerwonym. Równanie van der Waalsa pozwala na wyliczenie relacji pomiędzy współzrędnymi punktu krytycznego 3 ( $T_k$ ,  $p_k$ ,  $V_k$ ), a parametrami  $a$  i  $b$  równania [1]. Jedynie w obszarze współistnienia cieczy i pary nasyconej (kolor niebieski) izotermy van der Waalsa (np. punkty 5, 6) nie opisują stanów stabilnych. Ciśnienie pary nasyconej (w stałej temperaturze) nie zależy od objętości 1, 4, 2, zmniejszanie objętości powoduje skraplanie pary. Skroplenie pary jest możliwe jedynie dla temperatur mniejszych od temperatury krytycznej  $T_k$ . Dla temperatur większych związek występuje tylko w stanie gazowym. Dla wysokich temperatur lub dużych objętości równanie van der Waalsa przechodzi w równanie Clapeyrona.

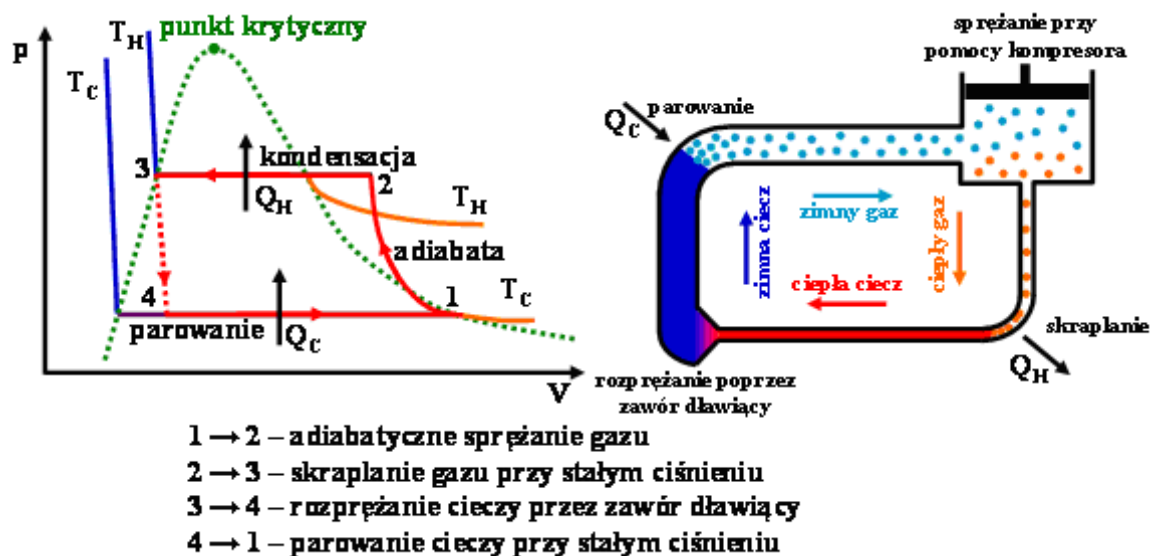


- 6) Omów skraplanie gazu van der Waalsa korzystając z wykresu izoterm.

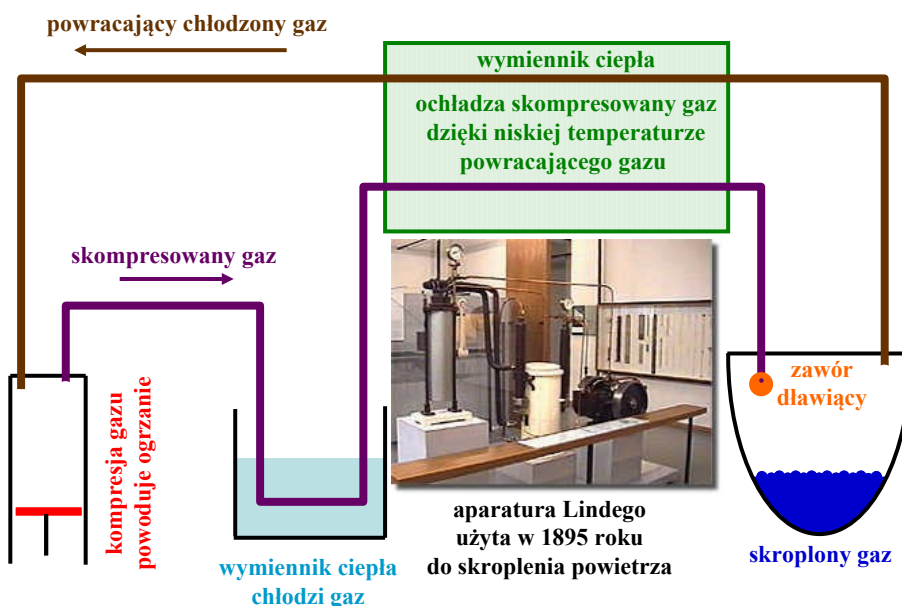
- 7) Proces dławikowy (Joule'a-Thomsona) to ciągły, powolny przepływ gazu wymuszony przez ruch tłoków utrzymujących stałe ciśnienia  $p_1 > p_2$ . Gaz przepływa przez porowatą przegrodę zwaną dławikiem. Proces jest adiabatyczny (bez wymiany ciepła z otoczeniem). W takim procesie gaz doskonały nie zmienia temperatury, ale gaz rzeczywisty może zmieniać. W wysokich temperaturach gazy rozszerzające się w procesie dławikowym ogrzewają się, ale poniżej pewnej temperatury zwanej temperaturą inwersji ochładzają się. Proces dławikowy ma szerokie zastosowanie w urządzeniach chłodniczych, zwłaszcza w technice skraplania gazów [2].



- 8) Opis działania chłodziarki kompresorowej. W szczególności opis działania lodówki oraz chłodziarek kompresorowych wykorzystujących hel. Minimalne temperatury uzyskiwane są przy odparowaniu  $^4\text{He}$  – 1.3 K, a  $^3\text{He}$  – 0.3 K.



- 8) Cykl Lindego – skraplanie gazów na skalę przemysłową



### Osiągnięcie niskich temperatur.

- VI. Obniżanie temperatury poprzez wykorzystanie procesu dławikowego (punkt 7). Tą metodą można nawet doprowadzić do skroplenia helu, czyli osiągnąć temperaturę 4.3 K. Zmniejszając ciśnienia nad powierzchnią wrzącego helu (metoda IV) uzyskano temperaturę 0.7K.

Literatura:

1. S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna cz.II., PWN Warszawa 1964.
2. C. Bobrowski, Fizyka - krótki kurs, WNT Warszawa 1999, str. 175.

## Temat 10: Efekt magnetokaloryczny – adiabatyczne rozmagnesowanie

Celem zajęć jest powiązanie zjawisk magnetycznych z efektami termodynamicznymi. Demonstrowane jest zachowanie się różnych materiałów w polu magnetycznym. Dyskutowana jest mikroskopowa budowa tych materiałów. Na tej podstawie przedstawiony jest efekt magnetokaloryczny oraz możliwości uzyskiwania bardzo niskich temperatur.

### Eksperymenty:

- 1) ferromagnetyk w polu magnetycznym
- 2) paramagnetyk w polu magnetycznym
- 3) diamagnetyk w polu magnetycznym
- 4) gorący ferromagnetyk w polu magnetycznym

#### 1) Ferromagnetyk w polu magnetycznym

Nitkę o długości 1-2 metrów zamocuj odpowiednio wysoko tak, aby mogła utworzyć wahadło. Do swobodnego końca nitki przywiąż mały kawałek żelaza. Do żelaza zbliż magnes i pokaż, że niezależnie od tego z której strony go zbliżysz, jest zawsze przyciągany przez magnes. W tym doświadczeniu możesz użyć słabego magnesu. W kolejnych dwóch doświadczeniach konieczne jest użycie silnego magnesu. Dlatego w tym doświadczeniu najlepiej użyć tego samego magnesu, który będzie używany w pozostałych eksperymentach. Pozwoli to na porównanie efektów dla różnych materiałów.

#### 2) Paramagnetyk w polu magnetycznym

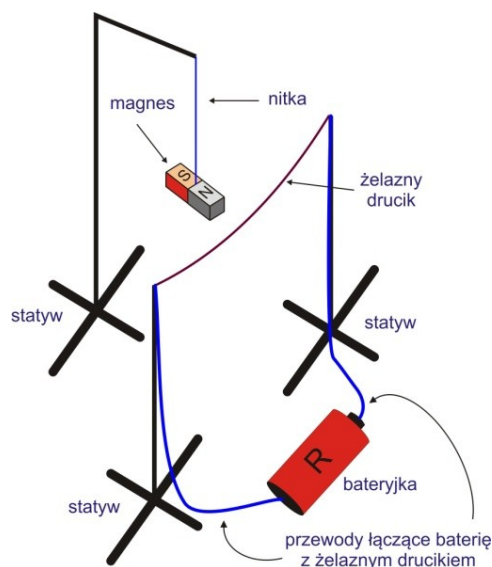
Do swobodnego końca nitki wcześniej skonstruowanego wahadełka przywiąż mały kawałek aluminium. Do aluminium zbliż magnes neodymowy lub elektromagnes i pokaż, że niezależnie od tego z której strony go zbliżasz, jest zawsze przyciągany przez magnes. Porównaj z przyciąganiem żelaza przez magnes. W przypadku aluminium efekt jest o wiele słabszy niż dla żelaza. W tym doświadczeniu konieczne jest zastosowanie silnego magnesu.

#### 3) Diamagnetyk w polu magnetycznym

Do swobodnego końca nitki wcześniej skonstruowanego wahadełka przymocuj kulkę winogrona. Winogrono zawiera bardzo dużo wody, która jest diamagnetykiem. Do winogrona zbliż magnes neodymowy lub elektromagnes i pokaż, że niezależnie od tego z której strony go zbliżasz, jest zawsze odpychane przez magnes. W przypadku winogrona efekt jest bardzo słaby. W tym doświadczeniu konieczne jest zastosowanie silnego magnesu.

#### 4) Gorący ferromagnetyk w polu magnetycznym

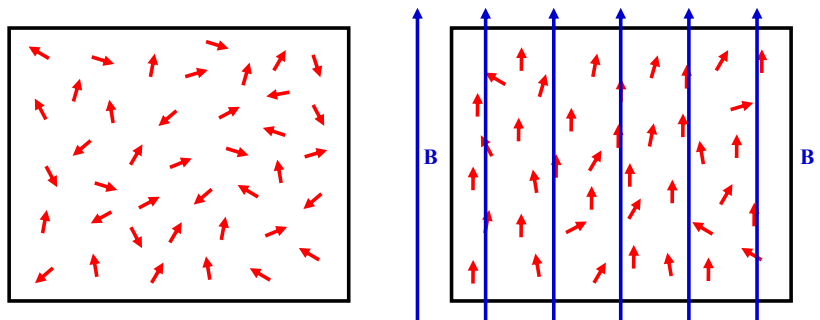
Do nitki o długości 10-20 cm przymocuj mały magnes. Nitkę przywiąż do statywu tak, aby magnes utworzył wahadełko. Przygotuj dwa statywy wykonane z izolatora (najłatwiej drewniane patyki umocowane do deseczki). Pomiedzy tymi statywami rozepnij żelazny drucik trochę powyżej poziomu, na którym znajduje się magnes wahadełka. Zbliż wahadełko z magnesu do drucika tak, aby magnes został przyciągnięty przez drucik. Przy pomocy metalowych spinaczy podłącz do drucika baterię 6 V. Spinacze powinny znaleźć się po przeciwnych stronach magnesu dotykającego drucik. Prąd przepływający przez drucik ogrzewa go. Po kilkunastu minutach drucik zaczyna się żarzyć i magnes odpada od drucika. Po odłączeniu baterii od drucika ulega on ostygnięciu



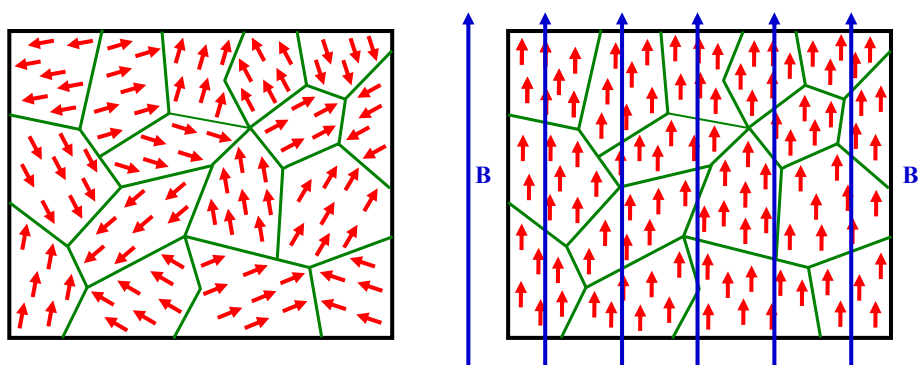
i magnes znowu samodzielnie jest przyciągany przez drucik. Demonstracja ta służy pokazaniu punktu Curie, czyli temperatury, w której ferromagnetyk przechodzi w paramagnetyk.

### Zagadnienia

- 1) W diamagnetykach przy braku zewnętrznego pola magnetycznego cząsteczki nie mają momentu magnetycznego. Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje małe zaburzenie orbitali elektronów na skutek tego pojawia się słaba magnetyzacja materiału skierowana w kierunku przeciwnym do pola magnetycznego. Powoduje to, że diamagnetyk odpychany jest przez magnes.
- 2) W paramagnetykach cząsteczki mają własne momenty magnetyczne, które przy braku zewnętrznego pola magnetycznego skierowane są przypadkowo. W zewnętrznym polu magnetycznym momenty magnetyczne cząstek starają się ustawić równoległe do linii pola magnetycznego. Ruchy termiczne powodują, iż nie wszystkie momenty magnetyczne są równoległe do linii pola magnetycznego. Magnetyzacja materiału paramagnetycznego jest zgodna z kierunkiem pola magnetycznego, dlatego paramagnetyk przyciągany jest przez magnes.

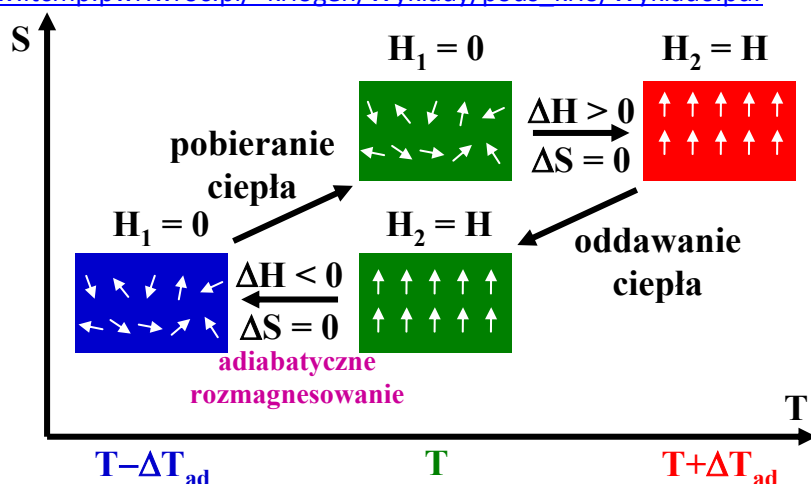


- 3) W ferromagnetyku istnieją domeny magnetyczne, czyli makroskopowe obszary, w których istnieje silny moment magnetyczny. Momenty magnetyczne sąsiadnych atomów są silnie sprzężone dzięki temu wewnątrz jednej domeny są one skierowane tak samo. Domeny mają duże momenty magnetyczne i w silnym, zewnętrznym polu magnetycznym momenty magnetyczne domen są skierowane tak samo. Energia domen w polu magnetycznym jest bardzo duża w porównaniu z energią termiczną. Magnetyzacja ferromagnetyka jest zgodna z kierunkiem pola magnetycznego.



- 4) Chłodzenie przez adiabaticzne rozmagnesowanie paramagnetyka. Wykorzystując sole paramagnetyczne można impulsowo otrzymywać temperatury do 1 mK. Chłodziarki wykorzystujące sole paramagnetyczne używane są w zakresach temperatur 1 – 20 K. Poniżej na diagramie entropia-temperatura przedstawiony jest schemat chłodzenia przez adiabaticzne rozmagnesowanie. Więcej informacji znajdziesz na stronie

[http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods\\_krio/Wyklad6.pdf](http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods_krio/Wyklad6.pdf)



- 5) Gigantyczny efekt magnetokaloryczny. W 1997 roku odkryto, że dla pewnych substancji otrzymuje się bardzo silny efekt zmiany temperatury przy zmianie pola magnetycznego. Efekt ten występuje dla temperatur zbliżonych do pokojowych. Można, więc budować nawet lodówki magnetyczne wykorzystujące ten efekt. Przykładem takiego urządzenia jest chłodziarka zbudowana przez Toshiba w 2004 roku.
- 6) Chłodzenie przez adiabaticzne rozmagnesowanie spinów jąder. Realizacja tego procesu i cykl przemian jest taki sam jak dla paramagnetyków. O ile w paramagnetyku wykorzystuje się momenty magnetyczne cząsteczek (pochodzące od elektronów znajdujących się na powłokach atomowych) to tutaj wykorzystuje się momenty magnetyczne jąder atomowych. Wartości jądrowych momentów magnetycznych są 1000 razy mniejsze niż wartości momentów magnetycznych atomów. Dzięki temu mniej chętnie ustawiają się zgodnie z kierunkiem pola magnetycznego. Pozwala to na uzyskiwanie bardzo niskich temperatur (mikrokelwin) przy ich adiabaticznym rozmagnesowaniu, jakkolwiek wymagane są o wiele większe pola magnetyczne.

#### Osiąganie niskich temperatur.

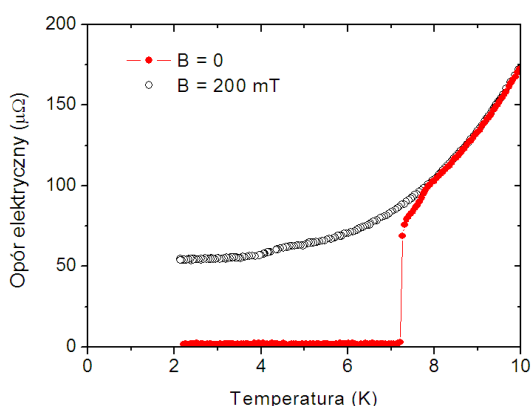
- VII. Obniżanie temperatury poprzez wykorzystanie procesu adiabaticznego rozmagnesowania. Przy rozmagnesowaniu ciał paramagnetycznych osiągnięto temperaturę rzędu  $10^{-3}$  K, a metodą rozmagnesowania jądrowego (jądrowych momentów magnetycznych)  $10^{-6}$  K

## Temat 11: Nowe własności substancji w bardzo niskich temperaturach

Wiele własności materiałów zależy od temperatury. Na przykład dla czystych metali opór elektryczny zmniejsza się wyraźnie wraz ze spadkiem temperatury. Stosunek oporu w temperaturze pokojowej do oporu w 4 K, może wynosić dla czystej miedzi nawet  $R_{300K}/R_{4K} = 200$ . Podobnie ciepło molowe kryształów, które zgodnie z prawem Dulonga-Petita wynosi w wysokich temperaturach około  $3R$  (gdzie  $R$  to stała gazowa), zmniejsza się wraz ze spadkiem temperatury aż do zera. W niskich temperaturach w niektórych materiałach pojawiają się też zupełnie nowe własności, z których najbardziej spektakularne jest nadprzewodnictwo.

### Najważniejsze własności nadprzewodników

Materiał będący w stanie nadprzewodzącym ma dokładnie zerowy opór elektryczny. Prąd stały może przez niego płynąć bez żadnych strat. W zamkniętej pętli zrobionej z nadprzewodnika raz wzbudzony prąd płynący w kółko nie zmniejsza się (na podstawie pomiarów oszacowano, że prąd ten nie zaniknie przez co najmniej 10 000 lat). Drugą charakterystyczną cechą stanu nadprzewodzącego jest idealny diamagnetyzm. Oznacza to, że wewnątrz nadprzewodnika indukcja pola magnetycznego  $B$  jest równa zeru. Z tego powodu nadprzewodnik jest wypychany z pola magnetycznego.



*Opór elektryczny próbki z ołowiu. Temperatura przejścia w stan nadprzewodzący wynosi w tym przypadku 7.2 K. Jeżeli próbka jest w dużym polu magnetycznym to zachowuje się jak normalny, nienadprzewodzący metal, dla której opór w niskich temperaturach spada do wartości oporu resztkowego.*

Materiał będący w stanie nadprzewodzącym w bardzo niskiej temperaturze, po przekroczeniu temperatury krytycznej  $T_c$  przestaje być nadprzewodzący - przechodzi w tzw. stan normalny, w którym jak każdy metal ma pewien niezerowy opór elektryczny. Stan nadprzewodzący jest również niszczone przez zbyt duże pole magnetyczne. Maksymalne pole krytyczne przy którym dany materiał jest nadprzewodzący zależy od materiału. Przykładowy diagram fazowy dla ołowiu pokazany jest na wykresie na następnej stronie.

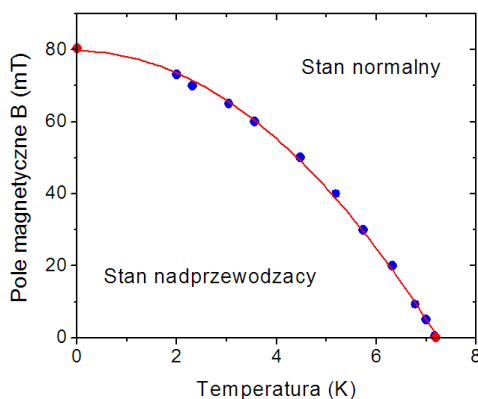
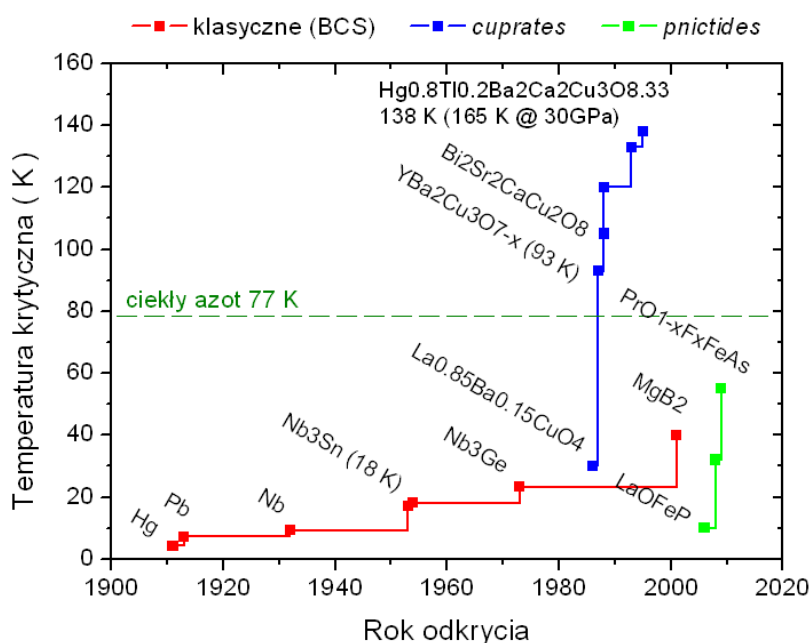


Diagram fazowy dla nadprzewodzącego ołowiu. Temperatura krytyczna wynosi 7.2 K, a pole krytyczne około 80 mT.

Dla pierwszego odkrytego 100 lat temu nadprzewodnika: rtęci  $T_c = 4.2$  K, obecnie znane są nadprzewodniki z  $T_c$  około 140 K. Wykres poniżej pokazuje historię odkryć materiałów nadprzewodzących. Pomimo, że pierwsze nadprzewodniki odkryto około 100 lat temu, to nadal nie są znane nadprzewodniki z temperaturą krytyczną powyżej temperatury pokojowej. Z tego powodu, żeby wykorzystywać nadprzewodnik trzeba go chłodzić, np. przy użyciu ciekłego azotu (77 K), albo ciekłego helu (4.2 K). Materiały dla których wystarcza chłodzenie ciekłym azotem nazywane są nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi, pomimo że chodzi o temperatury rzędu  $-196^\circ\text{C}$ .



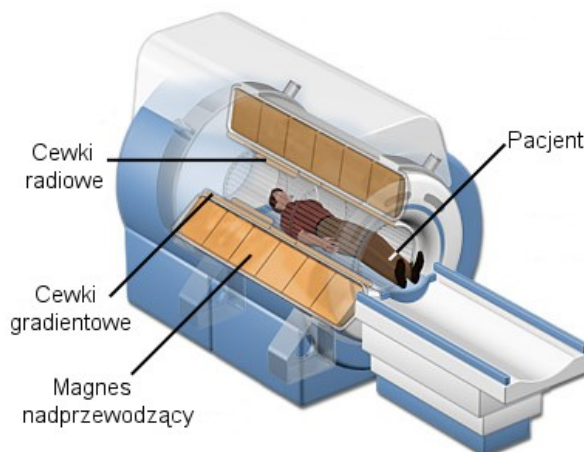
Historia odkryć nadprzewodników. Dwie najważniejsze grupy to tzw. nadprzewodniki klasyczne, które są stopami metalicznymi, oraz tlenki miedzi (cuprates), które są materiałami ceramicznymi.

### Zastosowania nadprzewodników

Własności i wymagania nadprzewodników powodują, że nadają się one idealnie do produkcji elektromagnesów wytwarzających duże pola magnetyczne. Roczna światowa produkcja nadprzewodników ma wartość około 4300 MEuro (dane za 2009 rok), z tego 4200 MEuro stanowiły nadprzewodniki klasyczne - wymagające chłodzenia ciekłym helem. Najczęściej wykorzystywany jest obecnie stop NbTi mający temperaturę krytyczną 9 K i pole krytyczne 15 T. Prawie 80% całkowitej produkcji wykorzystuje się do konstrukcji elektromagnesów potrzebnych do diagnostyki



medycznej metodą Magnetycznego Rezonansu Jądrowego. Pozostałe 20% posłużyło konstrukcji elektromagnesów dla celów badawczych, m.in. akceleratorów, w których rozpędzone cząstki naładowane krążą po zamkniętych orbitach, właśnie dzięki temu, że poruszają się w polu magnetycznym. Powszechnie obecnie znanym akceleratorem jest Large Hadron Collider w CERN, w którym chłodzone do 1.9 K magnesy z NbTi wytwarzają pole magnetyczne do 8.3 T.



*Schemat skanera magnetycznego rezonansu jądrowego. Typowe potrzebne pole to od 1.5 do 3 Tesli, jednorodne w dużym obszarze. Cewki elektromagnesu są zanurzone w ciekłym helu.*



*Przykładowy obraz z medycznego skanera MRI. W przeciwieństwie do zdjęć RTG jest dobry kontrast pomiędzy różnymi tkankami miękkimi.*

Zastosowanie nadprzewodników do bezstratnego przesyłu energii jest obecnie w fazie testowej. Potrzeba chłodzenia całego długiego przewodu bardzo utrudnia praktyczne zastosowanie. Cena ciekłego helu (około 10 Euro/litr) jest za wysoka dla zastosowania w rozległych systemach chłodniczych. Znacznie tańszy jest ciekły azot (cena produkcji około 0.1 Euro/litr) i dlatego do przesyłu energii stosowane muszą być nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Obecnie jest na świecie testowanych kilka kilkusetmetrowych kabli energetycznych (np. *Albany HTS Cable Project*) wykonanych z nadprzewodników wysokotemperaturowych. Największym problemem technicznym w szerokim zastosowaniu nadprzewodników wysokotemperaturowych jest fakt, że są one wszystkie materiałami ceramicznymi, a więc są kruche i trudno zrobić z nich drut, który potrzeba wyginać. Dodatkowo okazuje się, że opór elektryczny granicy między dwoma kryształkami takiego spieku nie spada do zera. Dlatego zrobiony z nadprzewodników wysokotemperaturowych drut na całej swojej długości musi być prawie jednym monokryształem, co jest osiągnięte poprzez napylenie cienkiej (0.5 mikrometra) warstwy nadprzewodnika na odpowiednie podłoże. Obecnie



produkowane są takie przewody o długości do kilkuset metrów (dane z 2009 roku), ale postęp technologii w tej dziedzinie jest bardzo szybki.

**Możliwe demonstracje** (z powodu konieczności dostępu do ciekłego azotu oraz posiadania próbki nadprzewodnika wykonanie tej demonstracji może być trudne w warunkach szkolnych. Można w zamian obejrzeć bardzo dobre filmy.)

#### *Lewitacja magnesu trwałego nad nadprzewodnikiem*

W styropianowym talerzyku leży pastylka z nadprzewodnika wysokotemperaturowego  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ( $T_c = 91 \text{ K}$ ), lub lepiej  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ , ( $T_c = 110 \text{ K}$ ). Po nalaniu na dno ciekłego azotu ( $T = 77 \text{ K}$ ) pastylka ochładza się i przechodzi w stan nadprzewodzący. Umieszczony nad nią mały magnes (najlepiej neodymowy) zawisa w powietrzu. Jest to konsekwencją indukowania w pastylce nadprzewodnika umieszczonej w polu magnetycznym prądów wirowych. Wytwarzane przez te prądy pole magnetyczne znosi zewnętrzne pole magnetyczne wewnątrz nadprzewodnika (pole magnetyczne jest „wypychane” z nadprzewodnika). Sama pastylka nadprzewodząca staje się elektromagnesem, którego pole unosi (odpycha) umieszczony nad nią magnes.

Po wyparowaniu ciekłego azotu i ogrzaniu się pastylki, przestaje ona być nadprzewodnikiem. Prądy wirowe zostają zatrzymane, pastylka przestaje być elektromagnesem i magnes spada na pastylkę.

Film: <http://www.fys.uio.no/super/movies.html> (Superconductivity Lab., University of Oslo)